

L'OUTIL DE MODÉLISATION EN AIDE À LA CONNAISSANCE ET À LA GESTION DES RAVAGEURS À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

**Isabelle GRECHI
(Cirad, UPR HortSys)**

1

Atelier Divecosys, 18-20 octobre 2011, Cotonou

1. Introduction à l'outil de modélisation

- Un outil d'intégration et d'analyse de systèmes complexes
- Un outil d'aide à la conception de systèmes de culture
- Un exemple d'application: la gestion de pucerons en verger

2. Modèle I: une production intégrée de mangues

- Contexte et approche
- Questions de recherche

3. Modèle II: régulation de la noctuelle de la tomate

- Contexte: le projet ATP Omega3
- Présentation du cas d'étude
- Le modèle conceptuel
- Utilisation du modèle et simulations
- Conclusion et perspectives

4. Options de modélisation des réseaux trophiques

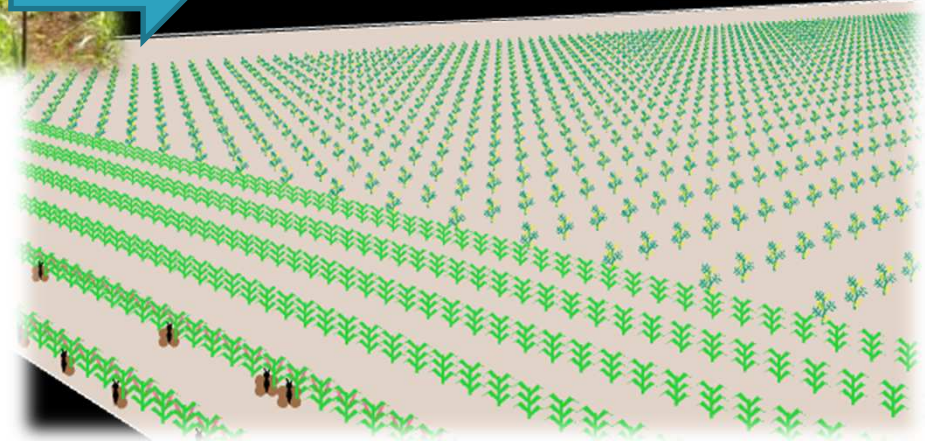
- Le modèle de Lotka-Volterra (MLV) et ses extensions
- Exemple de réseau trophique
- Conclusion

5. Conclusion générale

1. INTRODUCTION À L'OUTIL DE MODÉLISATION

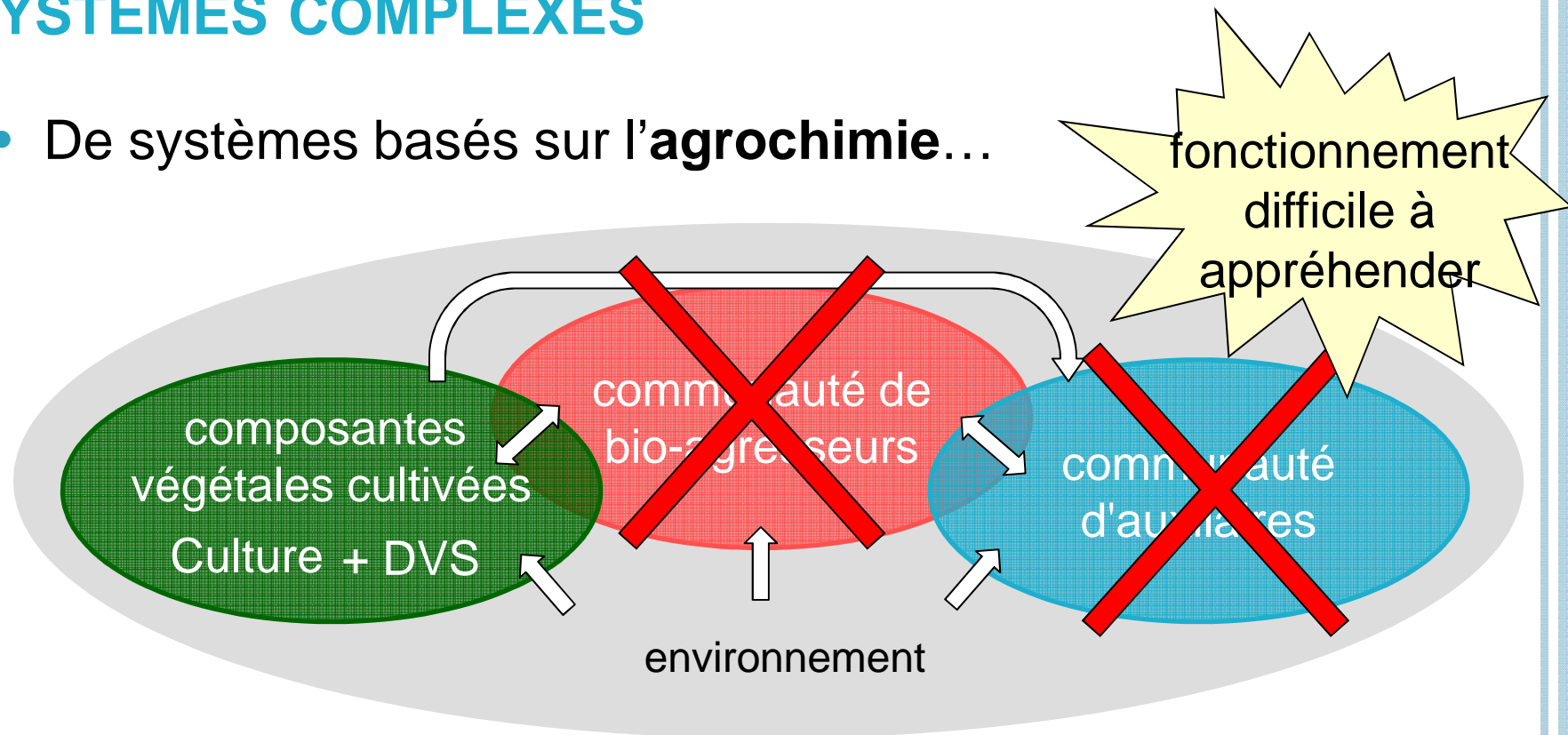


une représentation simplifiée
du monde réel....



1.1. UN OUTIL D'INTÉGRATION ET D'ANALYSE DE SYSTÈMES COMPLEXES

- De systèmes basés sur l'**agrochimie**...



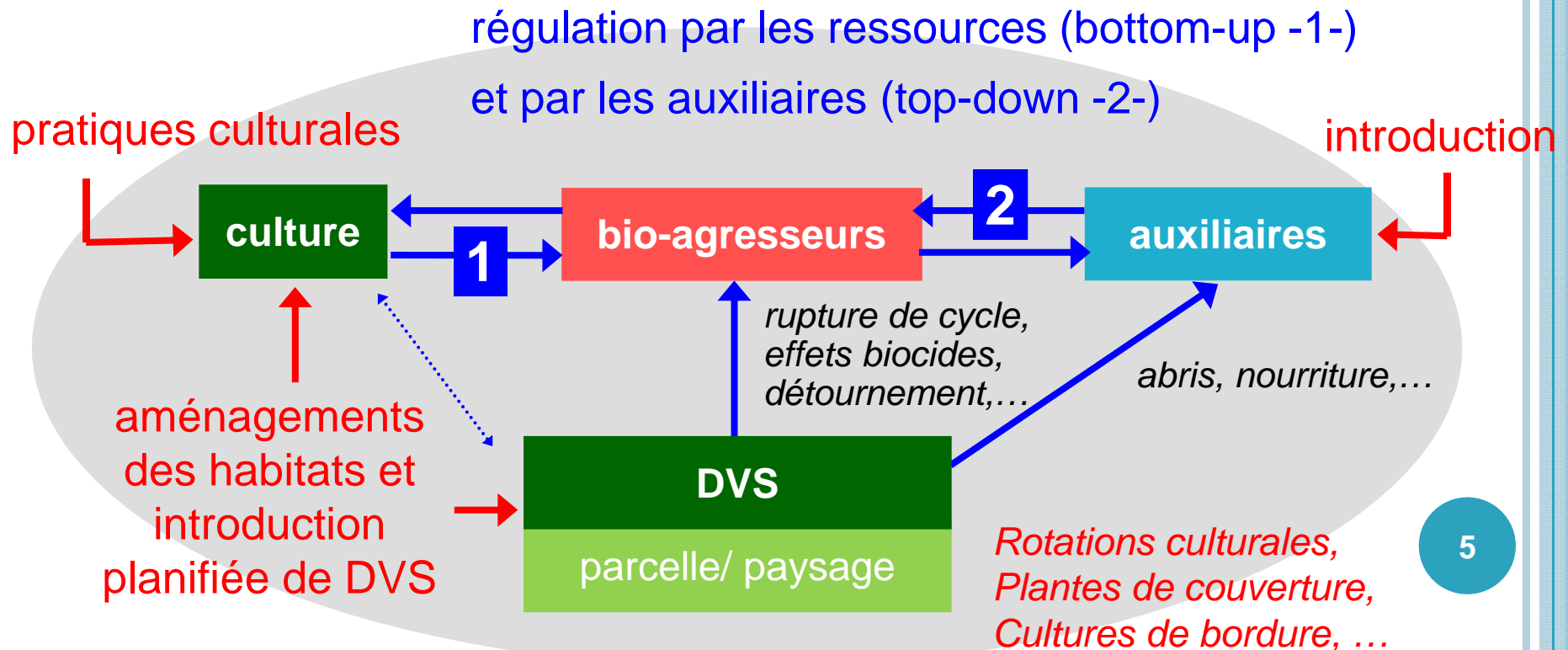
... vers des systèmes
basés sur le concept d'**intensification écologique**,
qui mobilisent les interactions et régulations biologiques.

- La modélisation: un cadre méthodologique adapté pour
donner une vision intégrée du fonctionnement du système

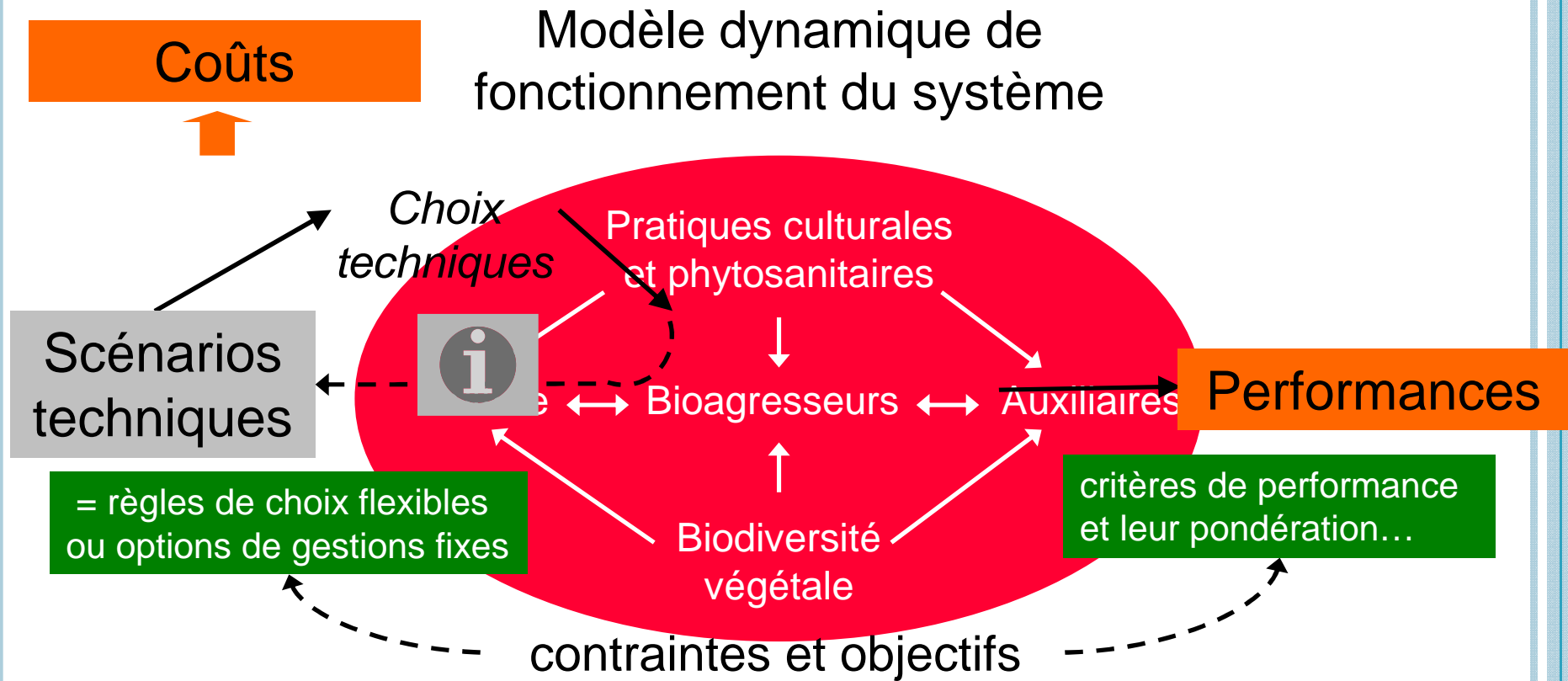
1.1. UN OUTIL D'INTÉGRATION ET D'ANALYSE DE SYSTÈMES COMPLEXES

Des modèles qui rendent compte:

- des interactions entre les composantes biologiques
- du pilotage de ces interactions par les pratiques

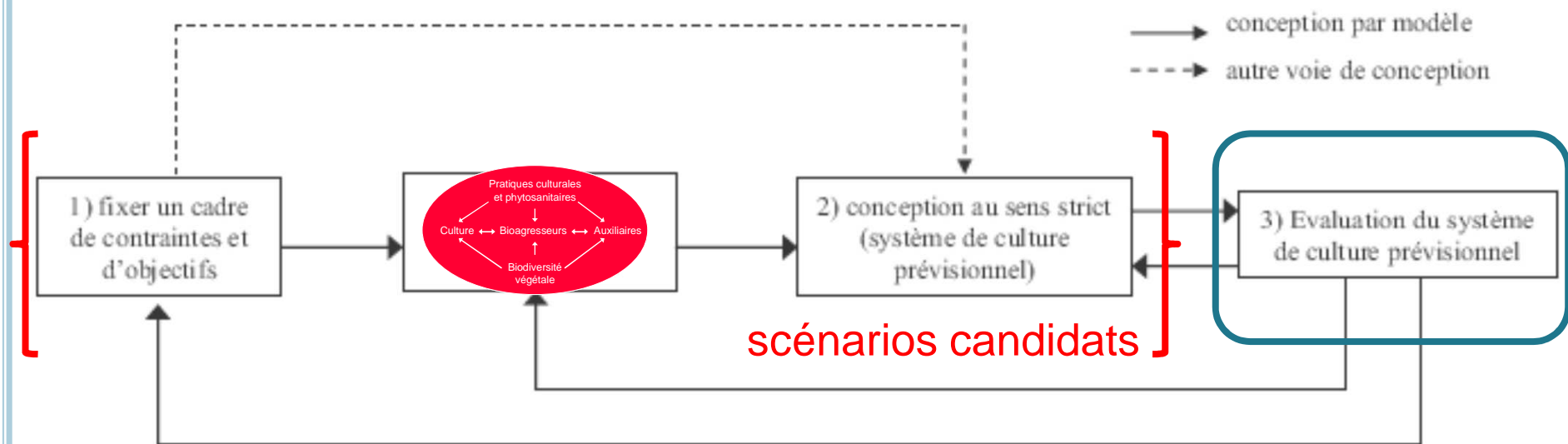


1.2. UN OUTIL D'AIDE À LA CONCEPTION DE SYSTÈMES DE CULTURE



1.2. UN OUTIL D'AIDE À LA CONCEPTION DE SYSTÈMES DE CULTURE

Les différentes étapes dans une démarche générale de conception de systèmes de cultures assistée par modèle :

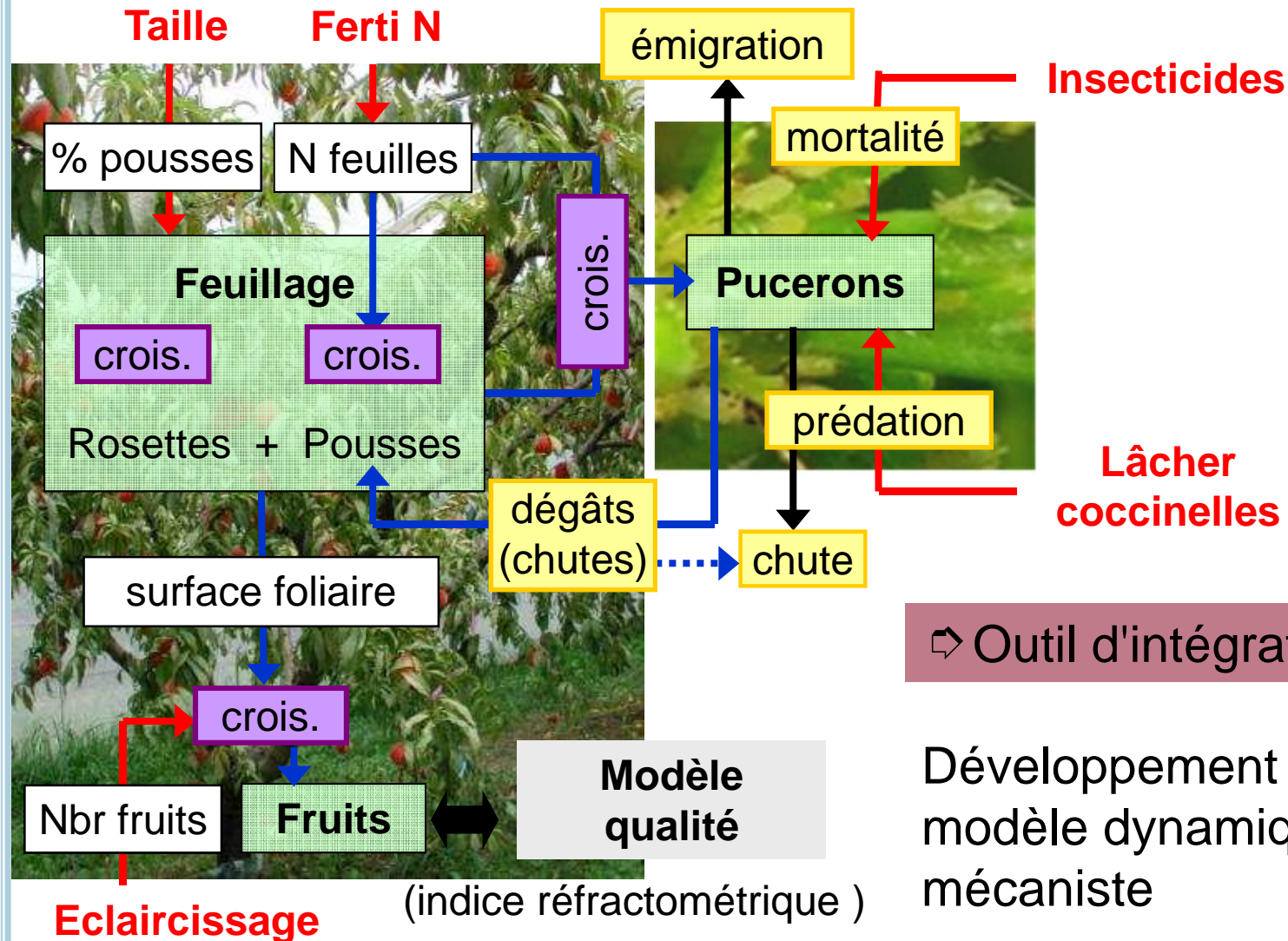


(d'après Meynard et al, 2001)

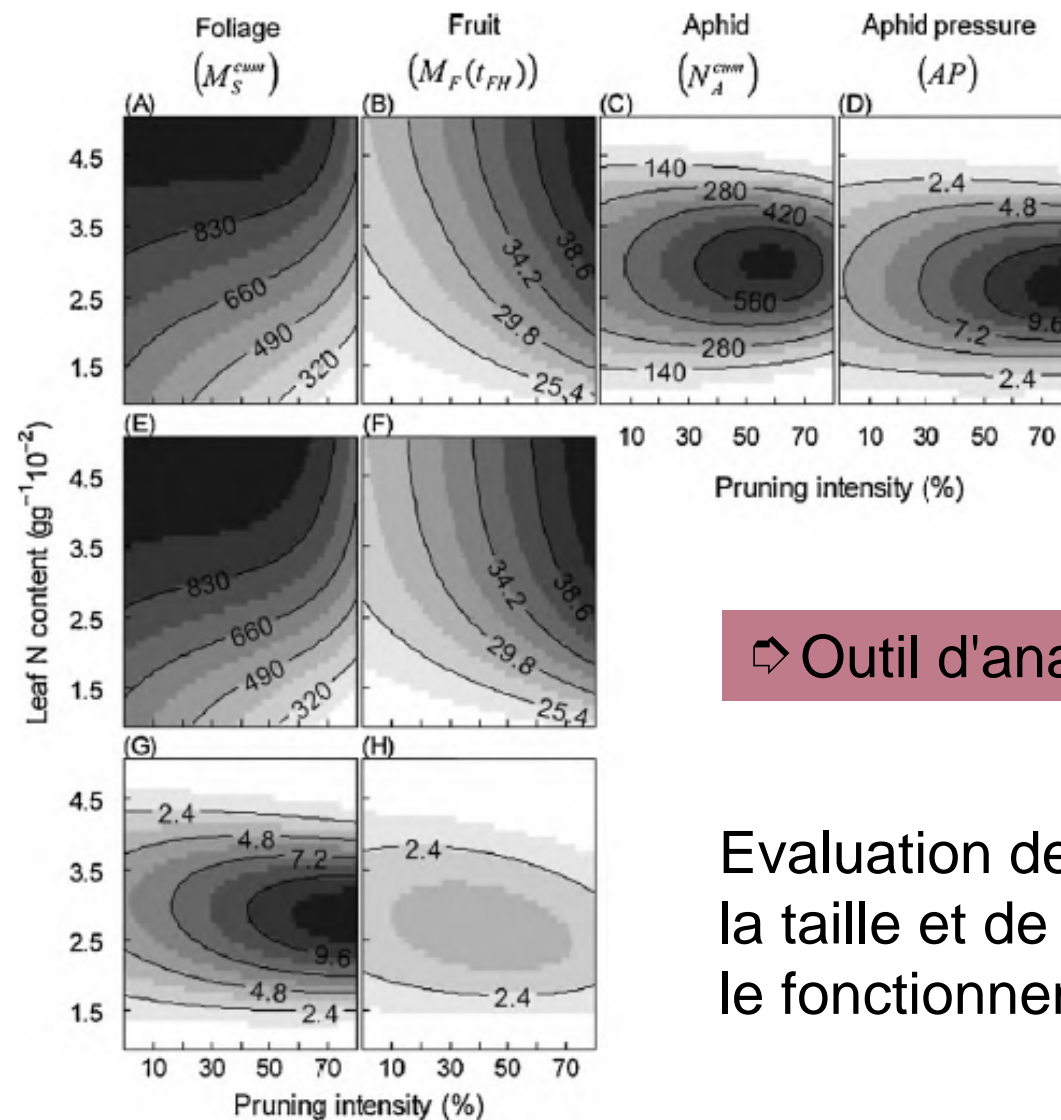
Dans cette approche, le modèle est supposé déjà exister!

1.3. UN EXEMPLE D'APPLICATION: GESTION DE PUCERONS EN VERGER

Cas du système "pêcher – puceron vert", en PFI



1.3. UN EXEMPLE D'APPLICATION : GESTION DE PUCERONS EN VERGER



⇒ Outil d'analyse du système

Evaluation de l'effet combiné de la taille et de la fertilisation N sur le fonctionnement du système

1.3. UN EXEMPLE D'APPLICATION : GESTION DE PUCERONS EN VERGER

⇒ Outil d'aide à la conception de systèmes

Management variables

- Pruning intensity
- N fertilization
- Fruit thinning
- Pest control strat.
- (...)

Définition de 3 profils de production

(via pondération des critères de performance) :

- PR_EC for Productive and Economic
- PR_ST for Productive and Sustainable
- QL_EN for Qualitative and Environmental

Performance variables

Productivity

- Yield
- N° ladybirds released

Sustainability

- N° aphids
- N° long shoot

Fruit quality

- Refractometric index

Environmental protection

- N° insecticides applications

PR_EC PR_ST QL_EN

| | | |
|------|------|------|
| 0.50 | 0.25 | 0.25 |
| 0.30 | 0.15 | 0.15 |
| 0.05 | 0.25 | 0.05 |
| 0.05 | 0.25 | 0.05 |
| 0.05 | 0.05 | 0.25 |
| 0.05 | 0.05 | 0.25 |

1 score global pour chaque ITK simulé

10

1 ITK

Modèle

1 profil de performances

Optimisation \Rightarrow définition du **profil de pratiques optimales**
(sur la base du score global) pour chaque profil de production et
par stratégie de protection :

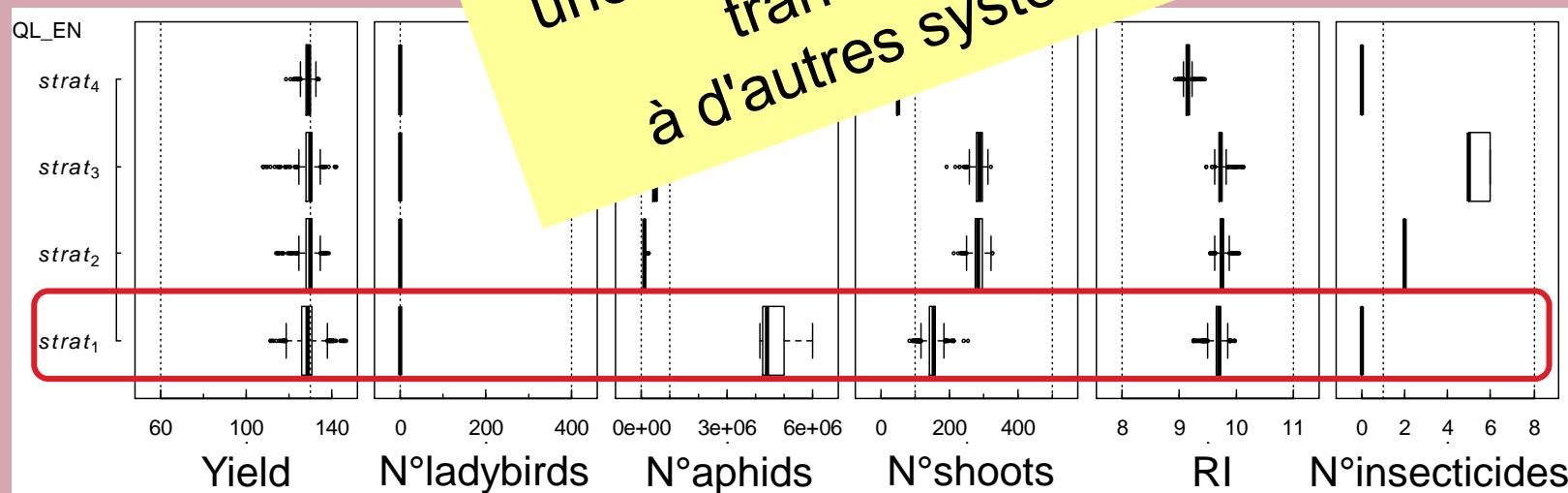
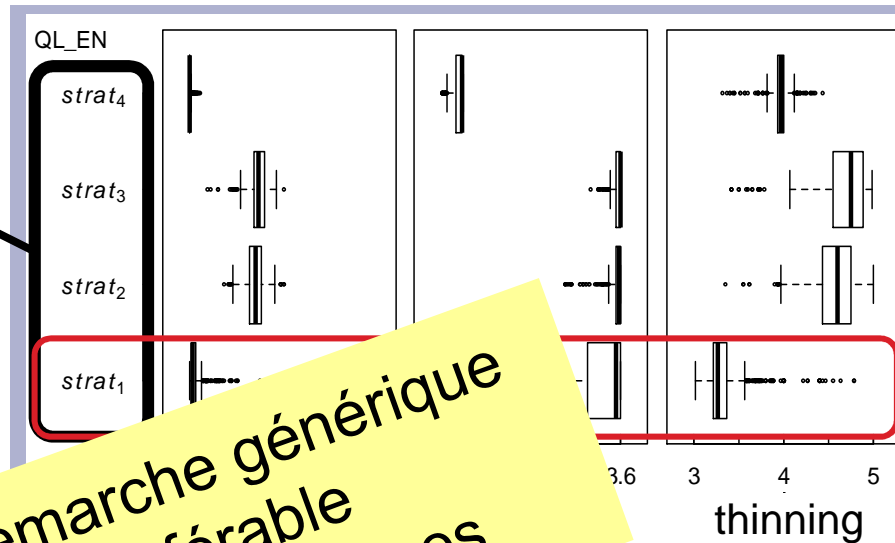
1 = sans traitements,
2 = conventionnel,
3 = AB,
4 = intégré

Ex pour le profil QL_EN

une démarche générique
transférable
à d'autres systèmes

pratiques
optimales

performances
correspondantes



2. MODÈLE I: UNE PRODUCTION INTÉGRÉE DE MANGUES



2.1. CONTEXTE ET APPROCHE

Contexte & enjeux:

Comment gérer durable le système de production pour:

- limiter l'alternance de production,
- améliorer les rendements,
- améliorer et homogénéiser la qualité des fruits,
- et **réduire l'impact des bio-agresseurs** (mouches des fruits) en utilisant des **méthodes alternatives aux pesticides** ?



⇒ *besoin d'une vision globale du fonctionnement du système*

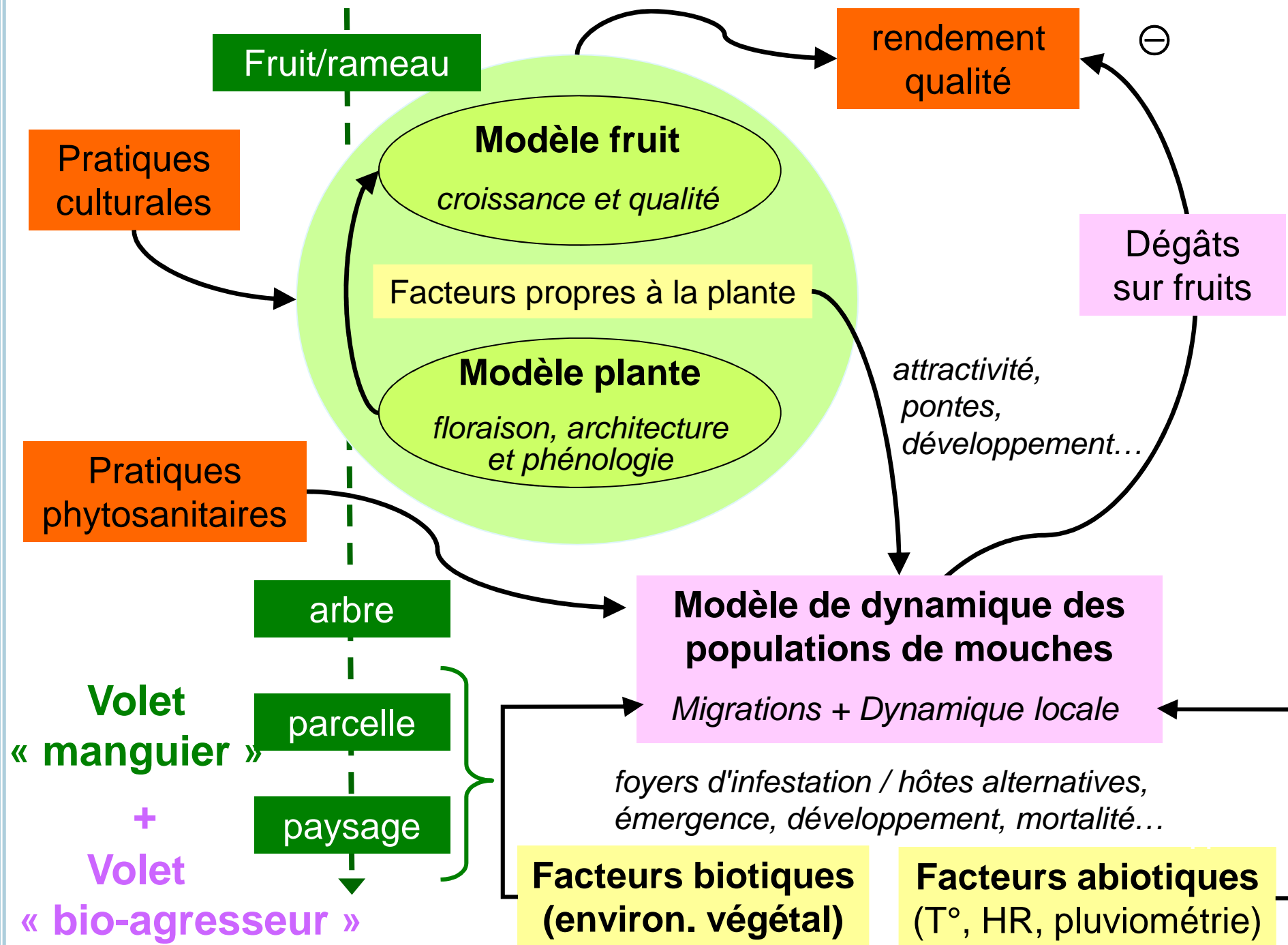
Approche:

Un **modèle** d'élaboration du rendement et de la qualité, couplant:

- modèle de « **fonctionnement du manguiier** »
- modèle de « **dynamique des bio-agresseurs** ».

Une initiative en 2010 (projet soumis : Ideofruit)

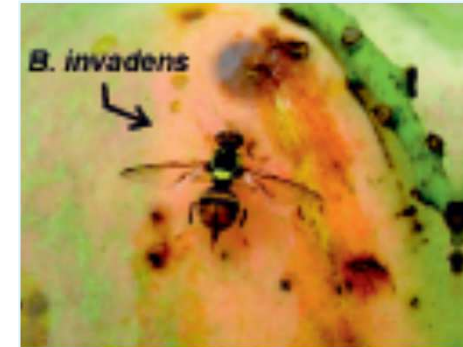
Parmi les collaborations : Réunion + Bénin + Sénégal



2.2. QUESTIONS DE RECHERCHE...

(1) Identifier les **déterminants de l'attractivité** des fruits vis-à-vis des mouches?

Modéliser leur évolution sous l'effet de **facteurs environnementaux et propres à la plante**



(2) Caractériser le **comportement de l'insecte** en réponse à ces déterminants

échelle arbre



(3) Effet de l'**environnement végétal** sur la dynamique des mouches?

Echelle parcelle / environnement immédiat + paysage

Rôle de la DVS cultivée ou naturelle dans cette dynamique?

3. MODÈLE II: RÉGULATION DE LA NOCTUELLE DE LA TOMATE



16

B. Rhino (Cirad, UPR 103 - Martinique)

A. Ratnadass (Cirad, UPR 103 - Niger / Montpellier)

Ph. Tixier (Cirad, UPR 26 - Martinique)

3.1. CONTEXTE: LE PROJET ATP OMEGA3

Optimiser les Mécanismes Ecologiques de Gestion des bio-Agresseurs pour une Amélioration durable de la productivité des Agrosystèmes



<http://omega3.cirad.fr>

3.1. CONTEXTE: LE PROJET ATP OMEGA3

- **Objectif :**

Concevoir des agrosystèmes innovants et durables qui réduisent :

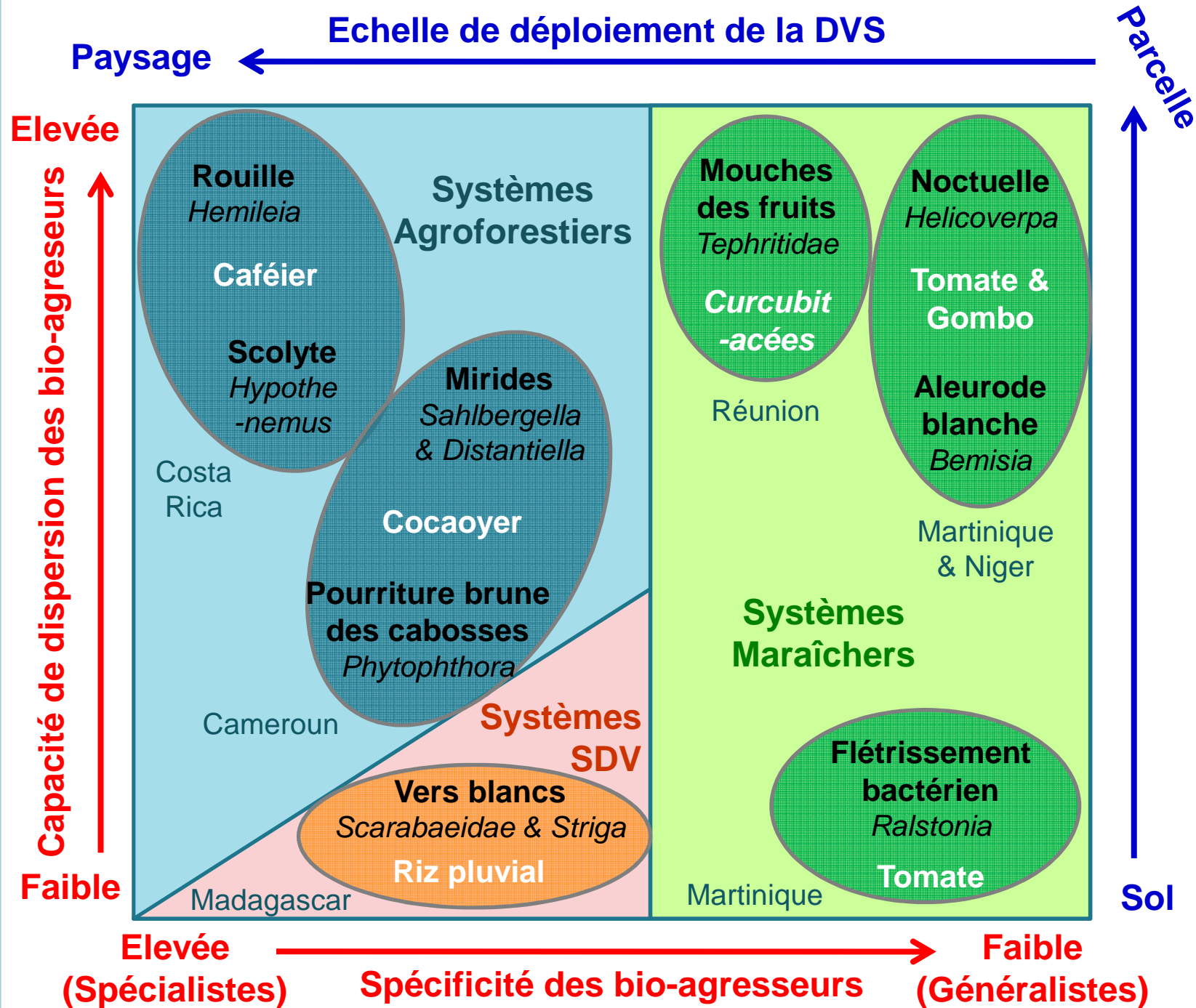
- les **impacts négatifs des pesticides** (systèmes intensifs)
- les fortes **pertes de production** dues aux bio-agresseurs (systèmes traditionnels à peu d'intrants)

Favoriser les mécanismes de régulation des bio-agresseurs basés sur une introduction planifiée de diversité végétale spécifique (DVS) dans les agrosystèmes.

- **Approche :**

Etude de **systèmes tropicaux contrastés** :

- échelle de déploiement de la DVS
- spécificité et capacité de dispersion des bio-agresseurs.



3.2. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

Régulation des noctuelles par introduction de plantes pièges



Parcelles de tomates avec bordure de maïs doux



Forte capacité de dispersion

Parcelle

Noctuelle
Helicoverpa

Tomate
& Gombo

Martinique
& Niger

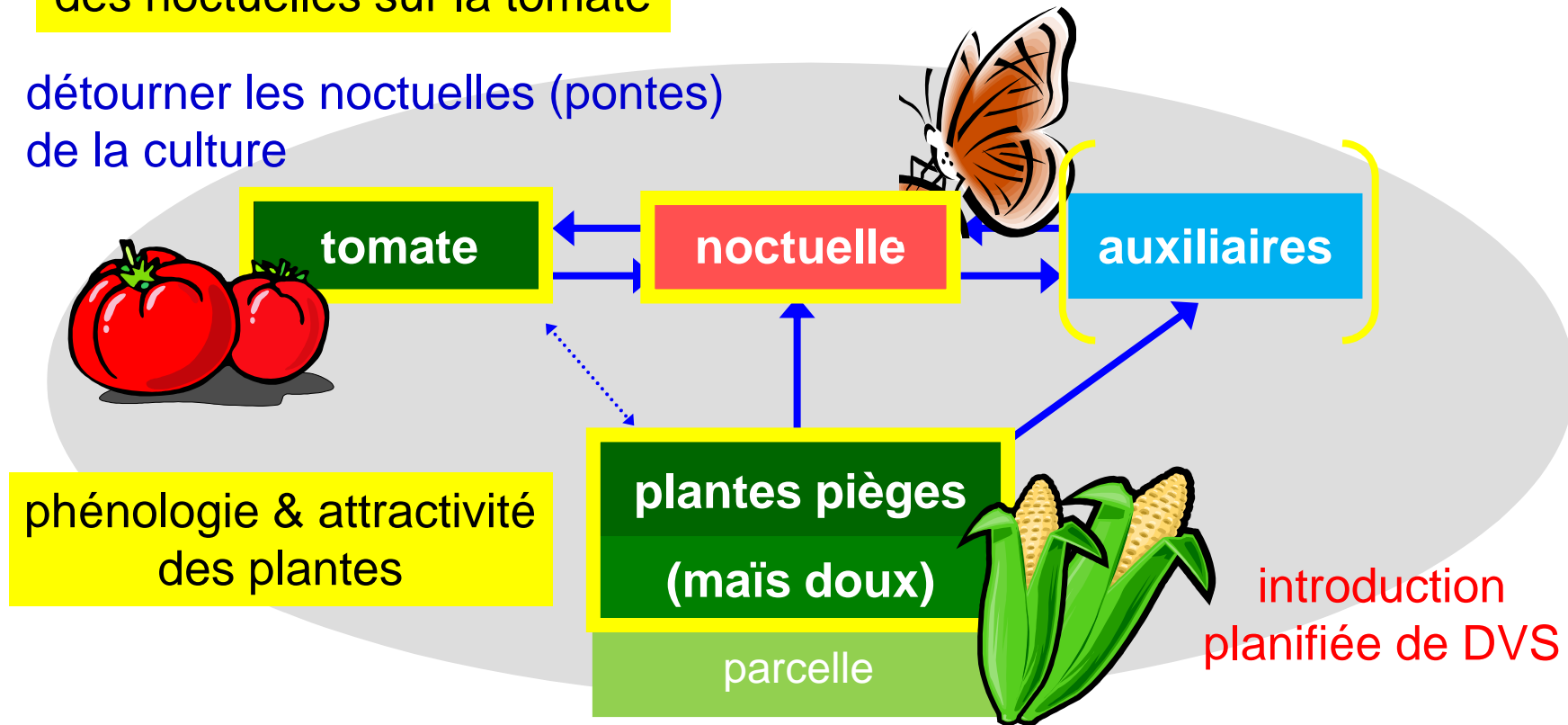
Faible spécificité

3.2. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

(1) Réduction des pontes
des noctuelles sur la tomate

⇒ **Modèle individu-centré**

détourner les noctuelles (pontes)
de la culture

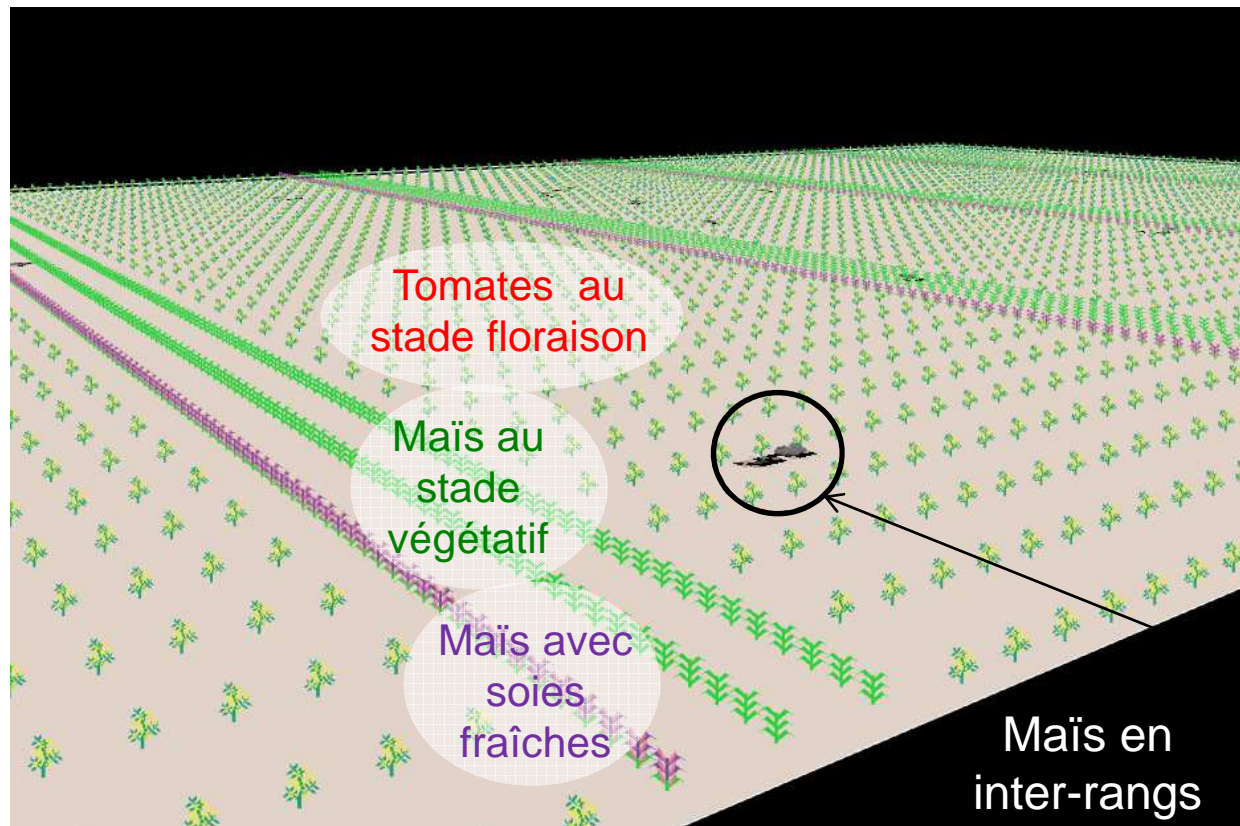


**Quel agencement spatial et de la phénologie des plantes
pièges pour optimiser la régulation des populations et
dégâts de noctuelles de la tomate à l'échelle de la parcelle?**

3.3. LE MODÈLE CONCEPTUEL

Modèle **dynamique** et **spatialement explicite**, qui représente :

- la **phénologie des plantes** (cultivées et pièges)
- le **déplacement** et le **développement des insectes**



Echelles :

- **parcelle**
- **1 cycle de production**

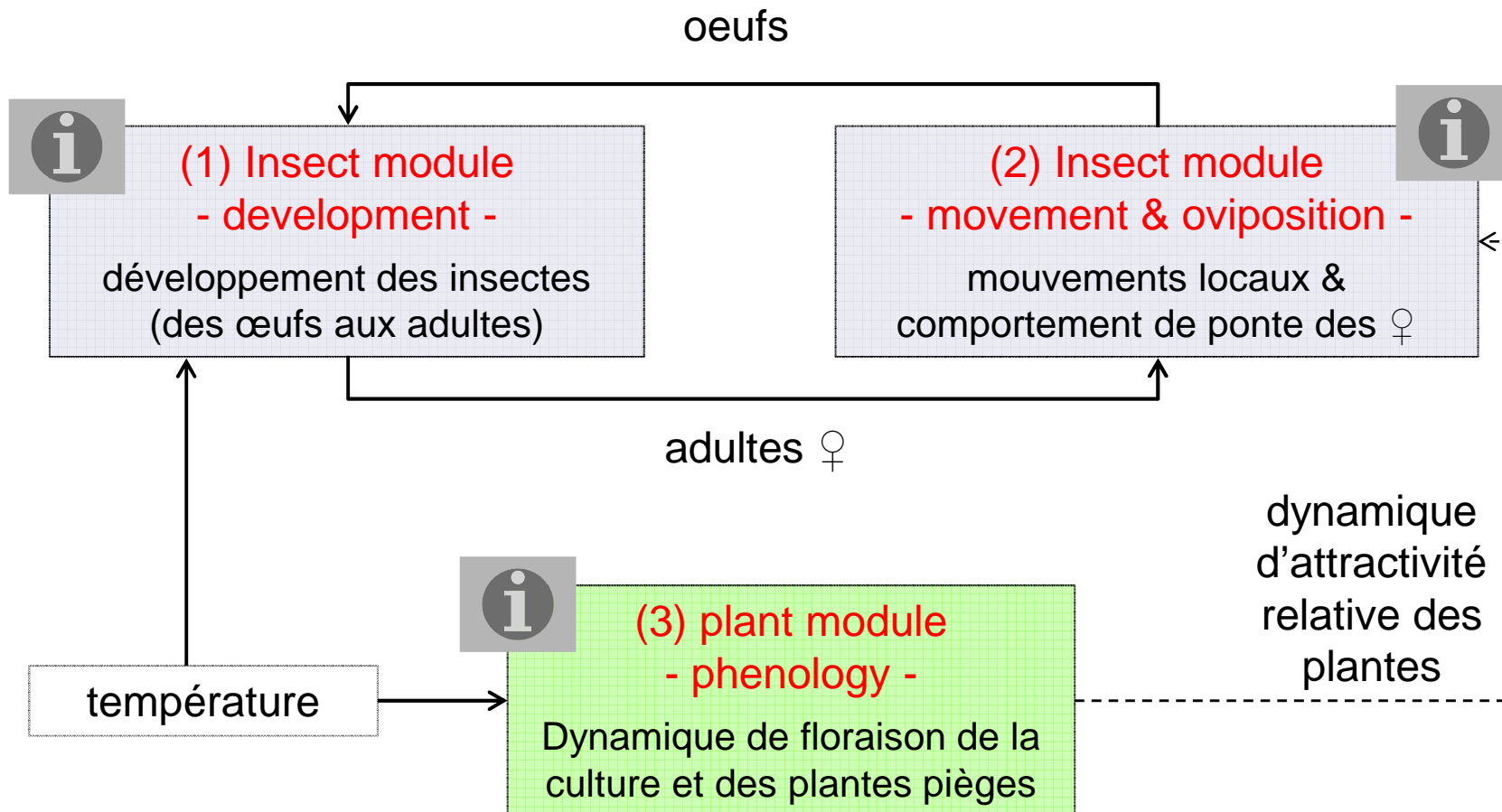
insecte:
adulte ♀



Plateforme NetLogo (accès libre)

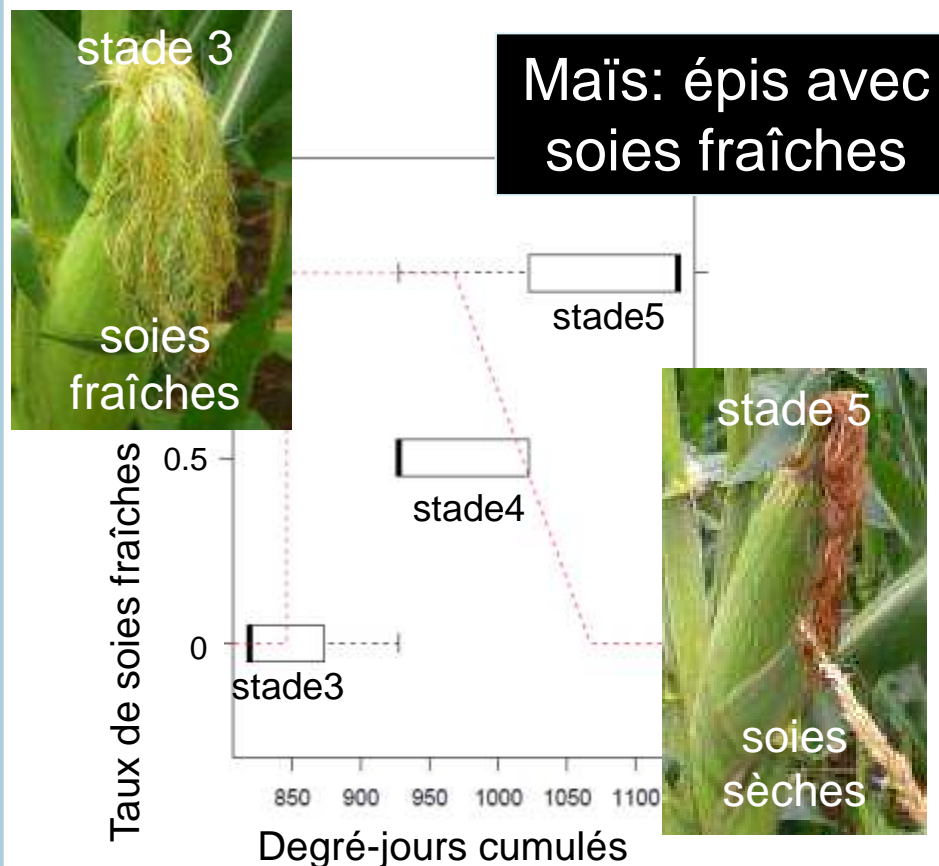
3.3. LE MODÈLE CONCEPTUEL

- 3 modules couplés :

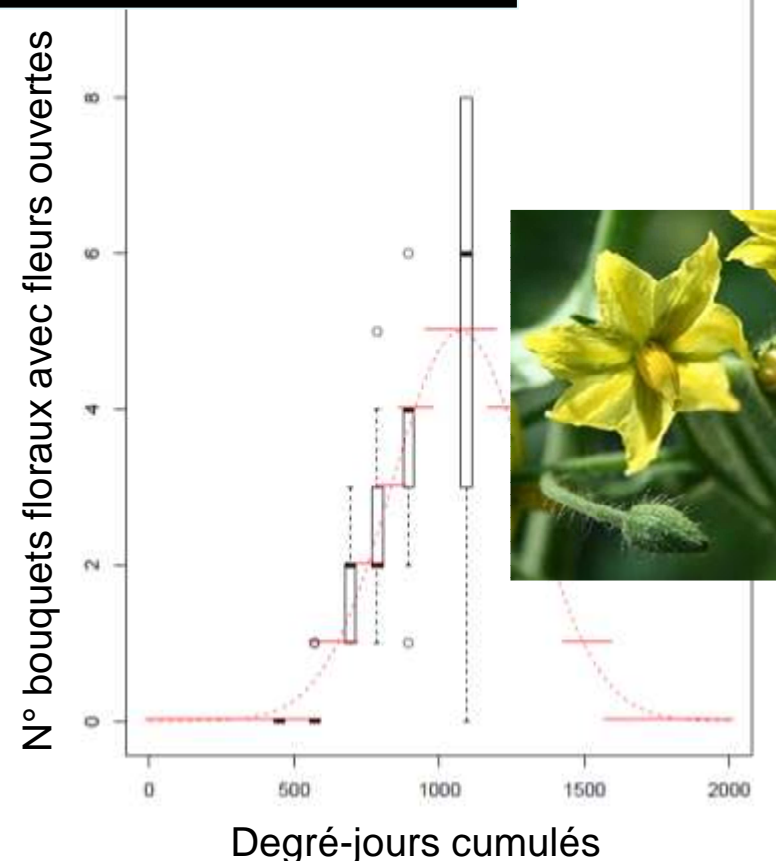


(3) Plant module - phenology -

- dynamiques d'apparition / d'extinction des stades floraux
- échelle de temps thermique ($^{\circ}\text{j}$)
- *données expérimentales*



Tomate: bouquets floraux avec fleurs ouvertes



➡ dynamiques de l'attractivité relative des plants de tomate et de maïs...

(3) Plant module - phenology -

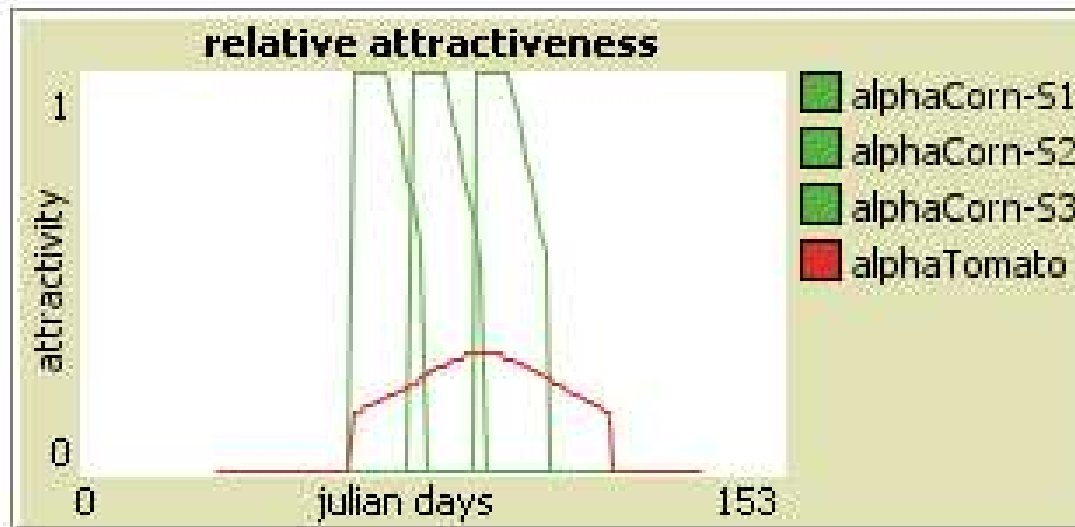


... hypothèses sur les **préférences de pontes** de l'insecte :

- **stades 'floraison' (tomate) et 'apparition des soies' (maïs)**
l'activité maximale de ponte d'*H. zea* coïncide avec le taux maximal de floraison

(Roltsch & Mayse 1984, Liu et al 2010, Dingue et al 2004, Zalom et al 1983,...)

- **maïs > tomate** (Purcell et al 1992, Jallow et al 2001)



➡ maïs plus attractif que la tomate, mais brièvement

➡ besoin d'optimiser le déploiement temporel des plantes pièges

Exemple de simulation avec 3 dates de semis successifs

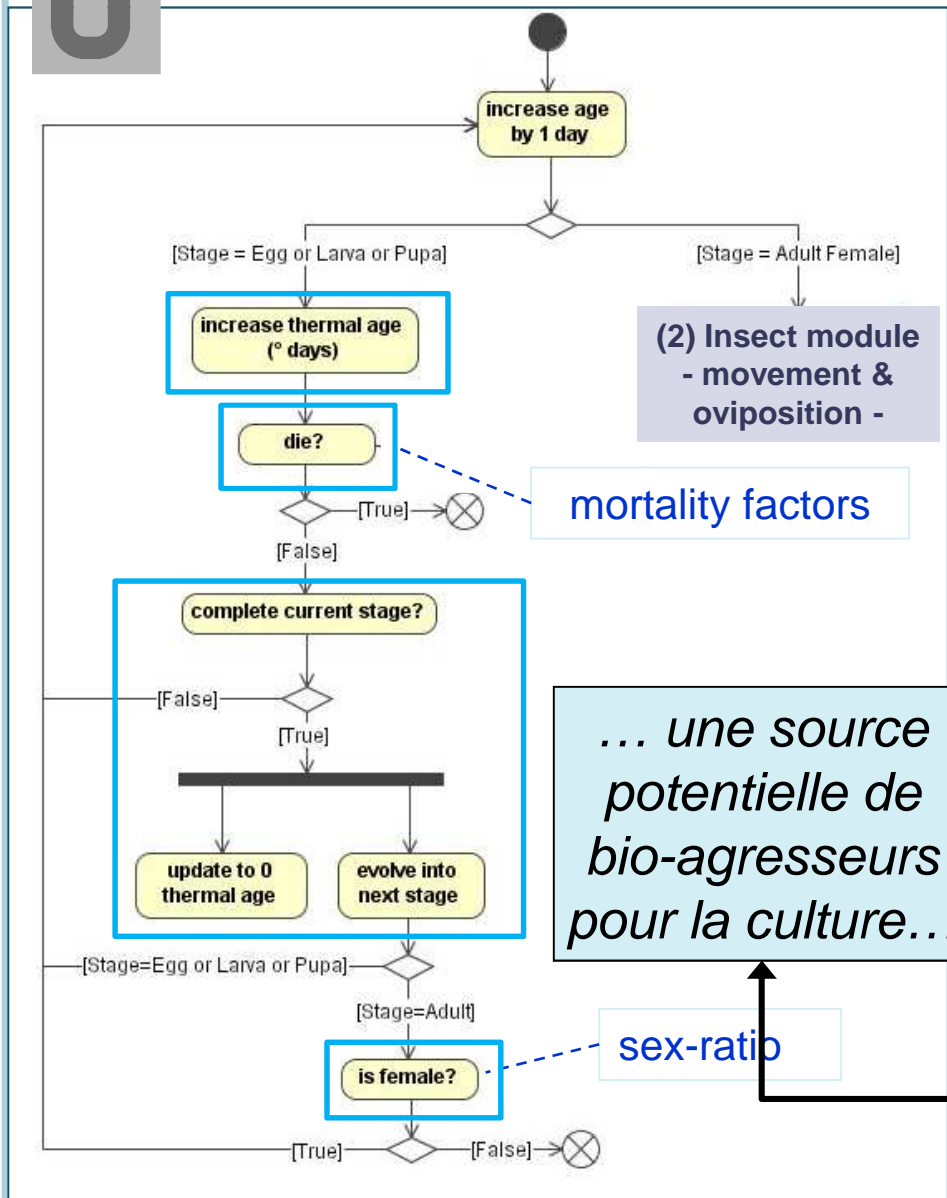
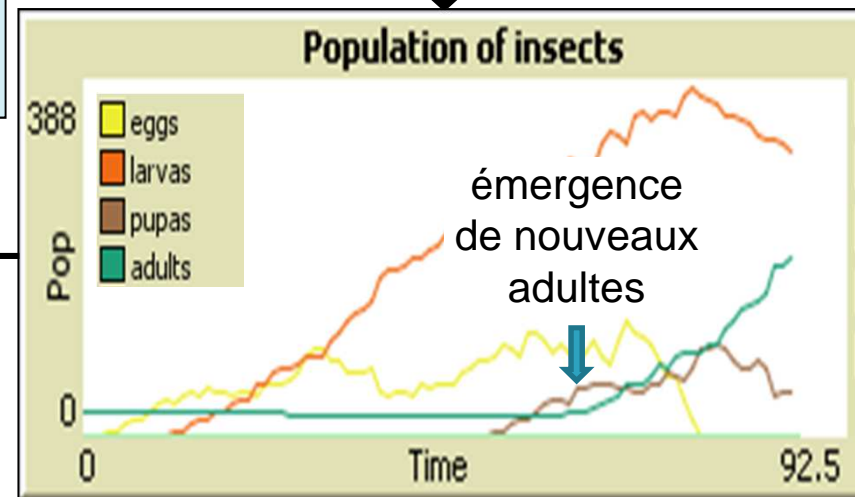


Diagramme d'activité (partie 1) : actions accomplies par un insecte chaque jour

(1) Insect module - development -

- **développement** : échelle de temps thermique (° j)
- **mortalité**: stade- et densité-dépendante (cannibalisme) (+ effet environnement : EN)
- *données expérimentales et de la littérature (Horner et al 2003, Hogg & Nordheim 1983, ...)*

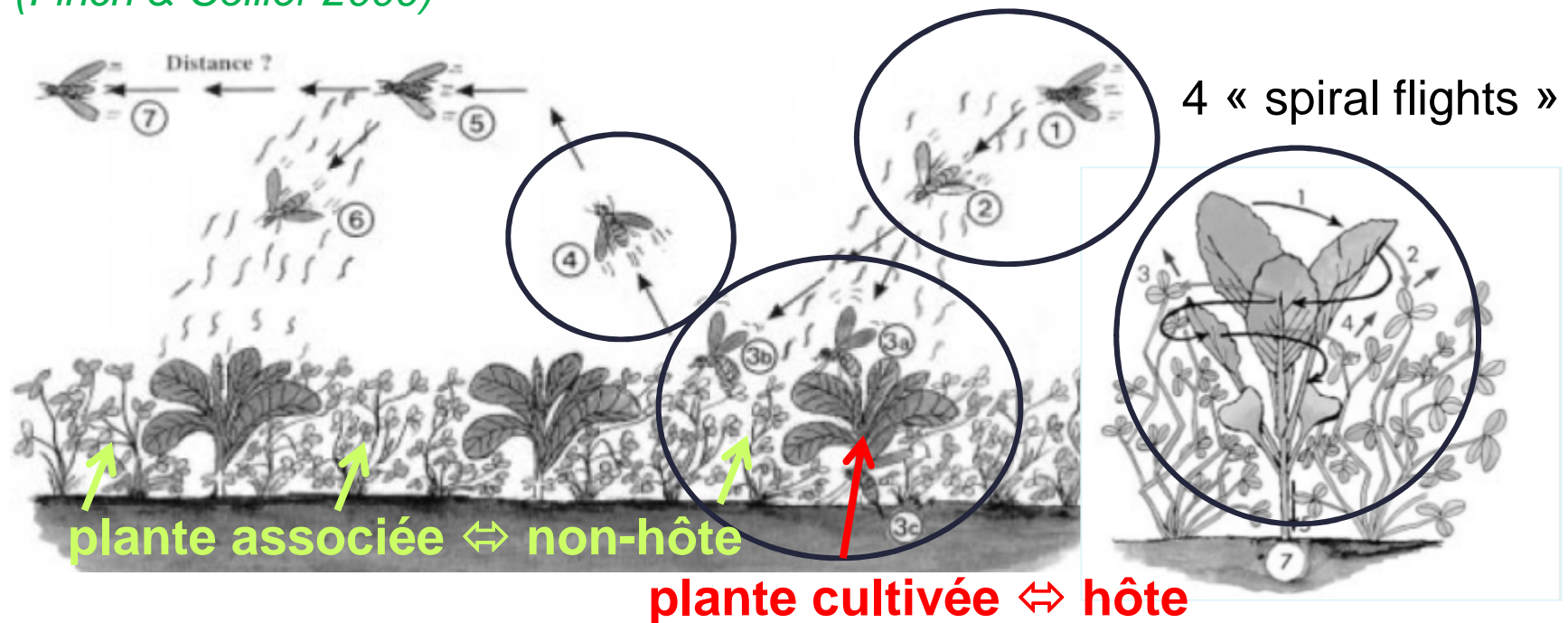


- à partir des connaissances existantes...

(2) Insect module - movement & oviposition -

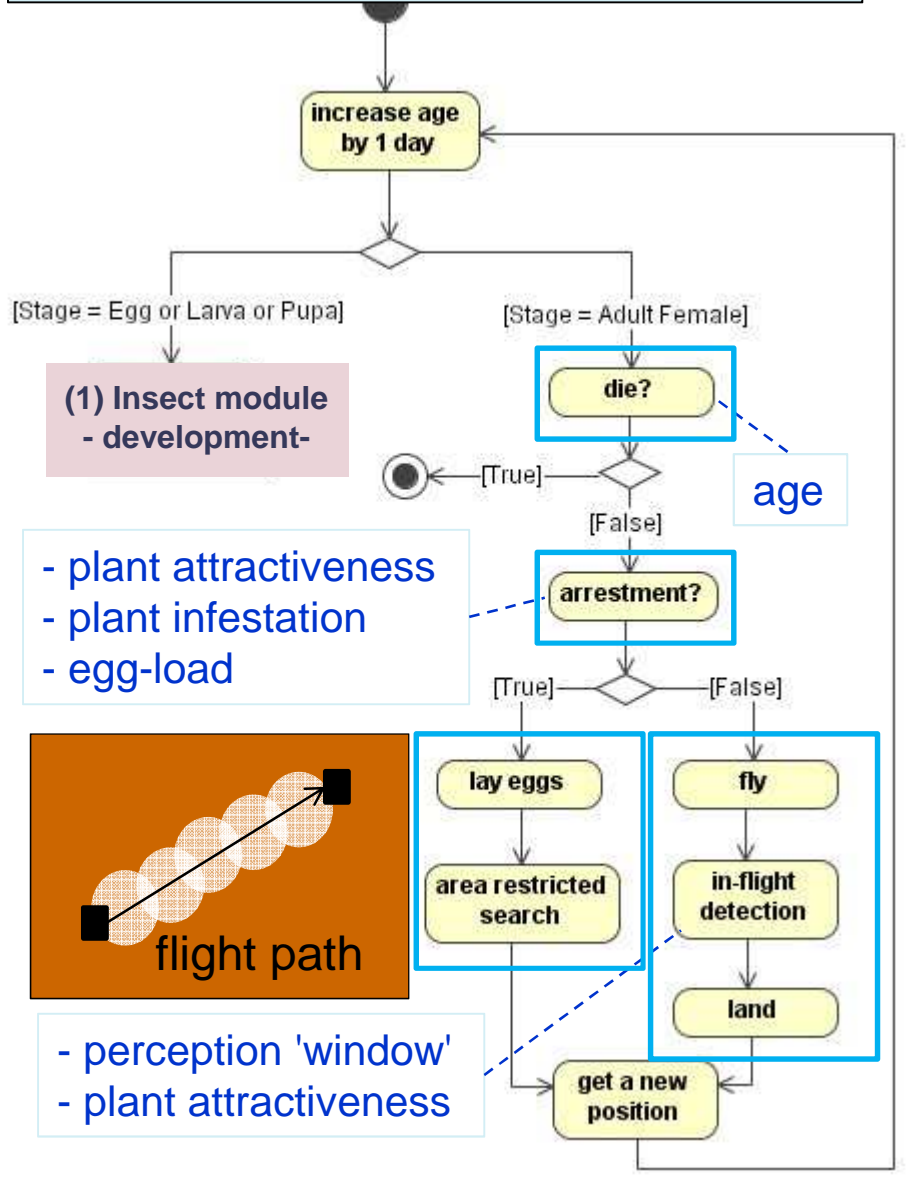
comportement de sélection des sites de ponte par les insectes

Un exemple: la théorie «appropriate/inappropriate landings»
(Finch & Collier 2000)



- (1) (2) perception de volatiles émis par la plante hôte
- (3) se pose aléatoire sur les feuilles vertes de plantes hôtes (« appropriate ») ou non-hôtes (« inappropriate landings »)
- (4) acceptation ou départ (en fonction des stimuli accumulés)

- flux entrant / sortant de la parcelle ?



(2) Insect module - movement & oviposition -

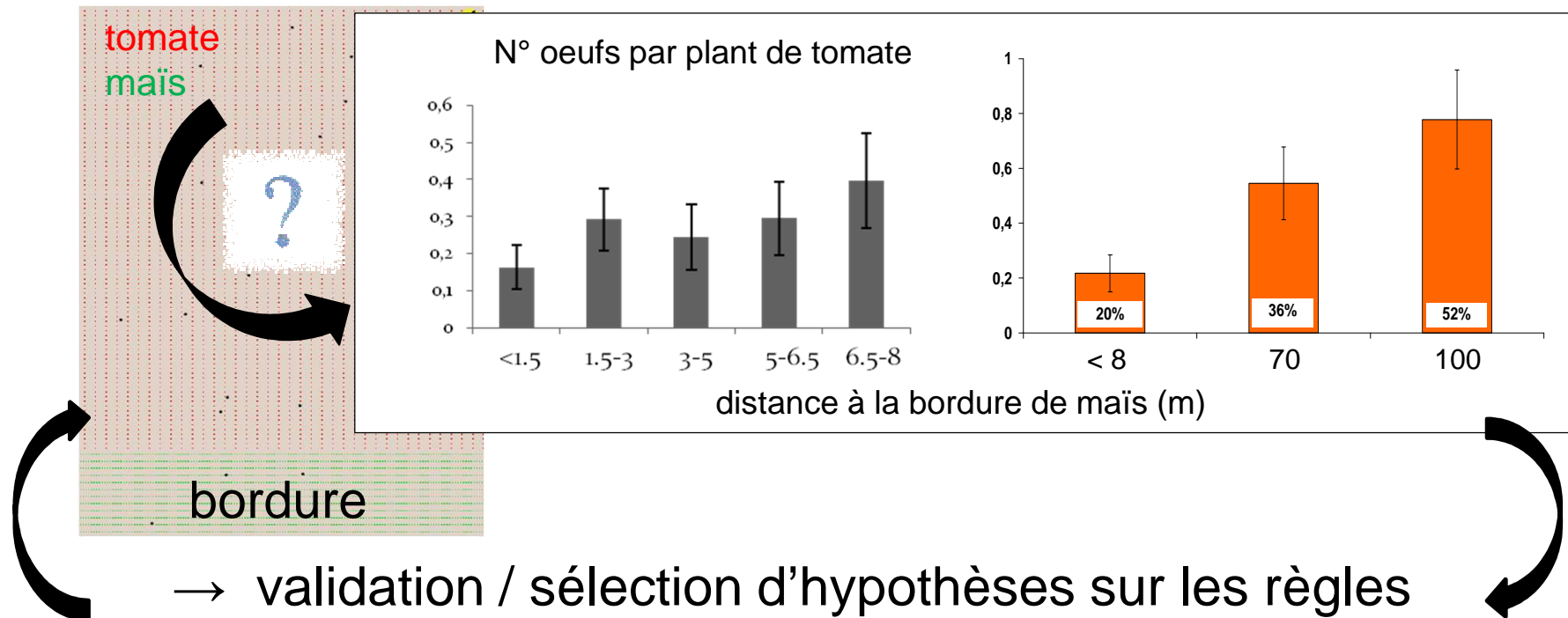
- mouvements locaux, parcelle
- **acceptation** de la plante après atterrissage
- **ponte** et **déplacement** restreint aux plantes voisines
- **vol**:
 - direction et distance aléatoires (*pas de vent, pas de limite de capacité de dispersion*).
 - perception (olfactive et/ou visuelle) de la plante hôte en vol
 - arrêt sur une plante (au cours de vol)

Diagramme d'activité (partie 2) : actions accomplies par un insecte chaque jour

• *données de la littérature...*
(Potting et al 2005, Fitt et al 1995,...)

3.4. UTILISATION DU MODÈLE ET SIMULATIONS

- Confrontation des données simulées aux données expérimentales (ou publiées)



- validation / sélection d'hypothèses sur les règles de comportement incluses dans le modèle
- cibler des essais complémentaires (AS)

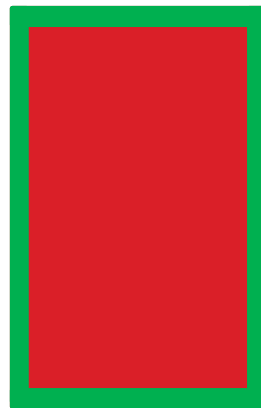
- Aller-retours entre expérimentation et modélisation

3.4. UTILISATION DU MODÈLE ET SIMULATIONS

- **Dynamiques d'infestation** des insectes en réponse :
 - aux **modalités de déploiement des plantes** pièges (composition et configuration),
 - aux **caractéristiques des plantes** (attractivité relative),
 - aux **traits de comportement de l'insecte**.



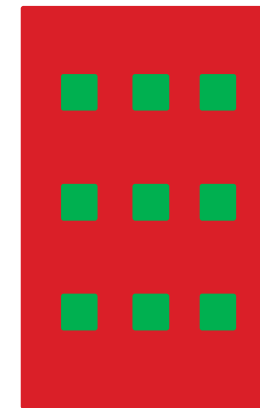
bordure



périmètre



bandes



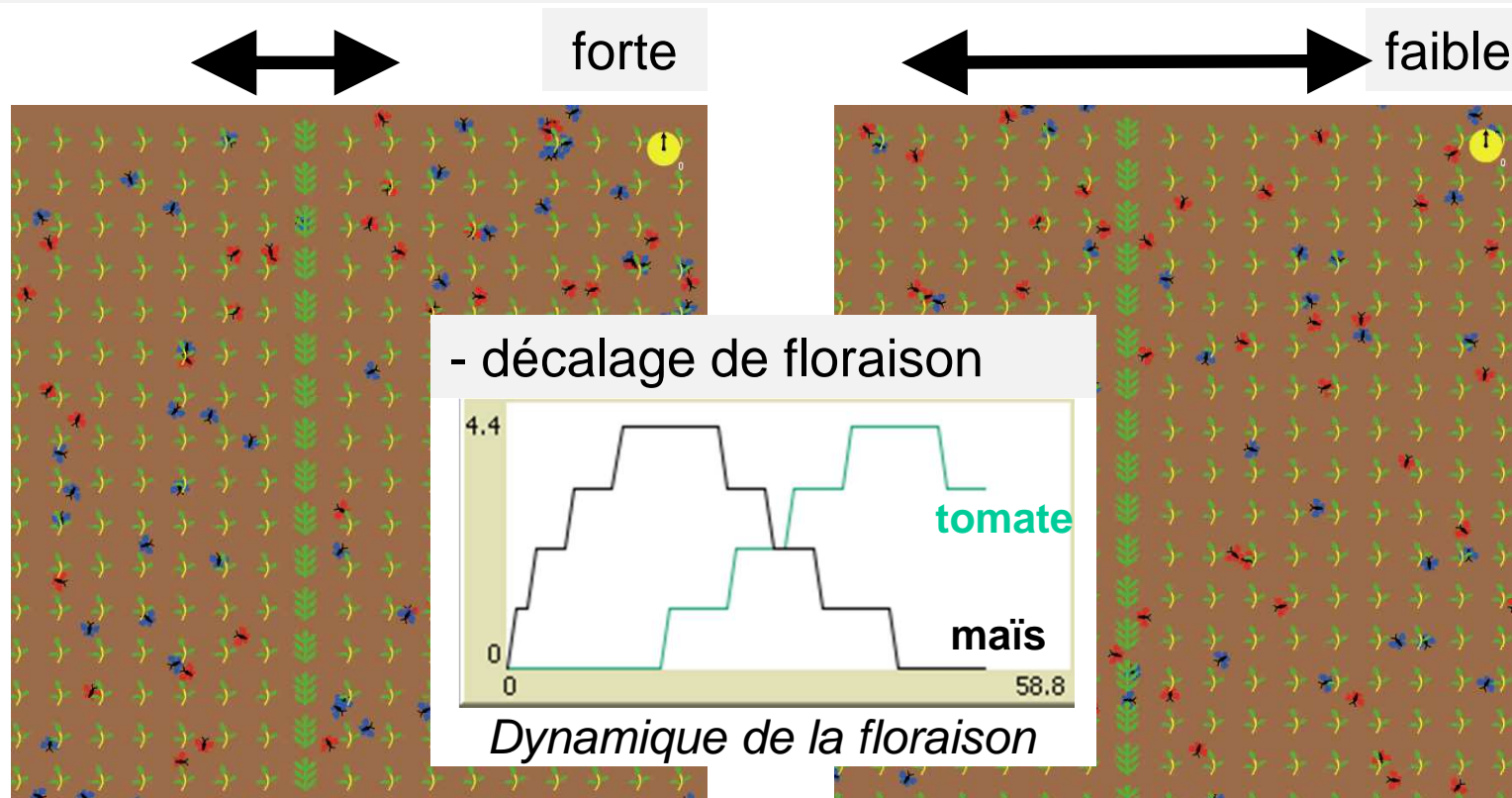
patches

→ définition de **patterns de réponses & règles générales**
→ évaluation de leur **sensibilité à certains paramètres et/ou hypothèses sur certains processus de comportement**
(cf approche de Potting et al 2005)

3.4. UTILISATION DU MODÈLE ET SIMULATIONS

1^{ère} version simplifiée du modèle (en cours de développement...)

- attractivité relative proportionnelle au taux de floraison
- attractivité relative maïs >> tomate
- importance de l'attractivité vs. part aléatoire dans le mouvement :



.... 1^{ère} adaptation du modèle COSMOS (Vinatier et al.)

3.5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- **Etat des connaissances et acquis...**

Des acquis expérimentaux :

- **efficacité** des plantes pièges
- '**phénologie** des plantes' & '**choix variétal** du maïs'...

MAIS mécanismes de dispersion & comportement de sélection des plantes par les insectes à mieux caractériser

Outil non figé qui peut évoluer : mises à jour du modèle avec acquisition de nouvelles connaissances:

- essais de comportement en conditions semi-contrôlés
- suivis d'individus au champ (méthodes: radio-télémétrie, marquage/recapture...?)

- **Perspectives...**

- mouvements entre la parcelle et son **environnement**?
- stratégie "**push-pull**": intégrer des **plantes répulsives**
- contrôle par les **auxiliaires**?

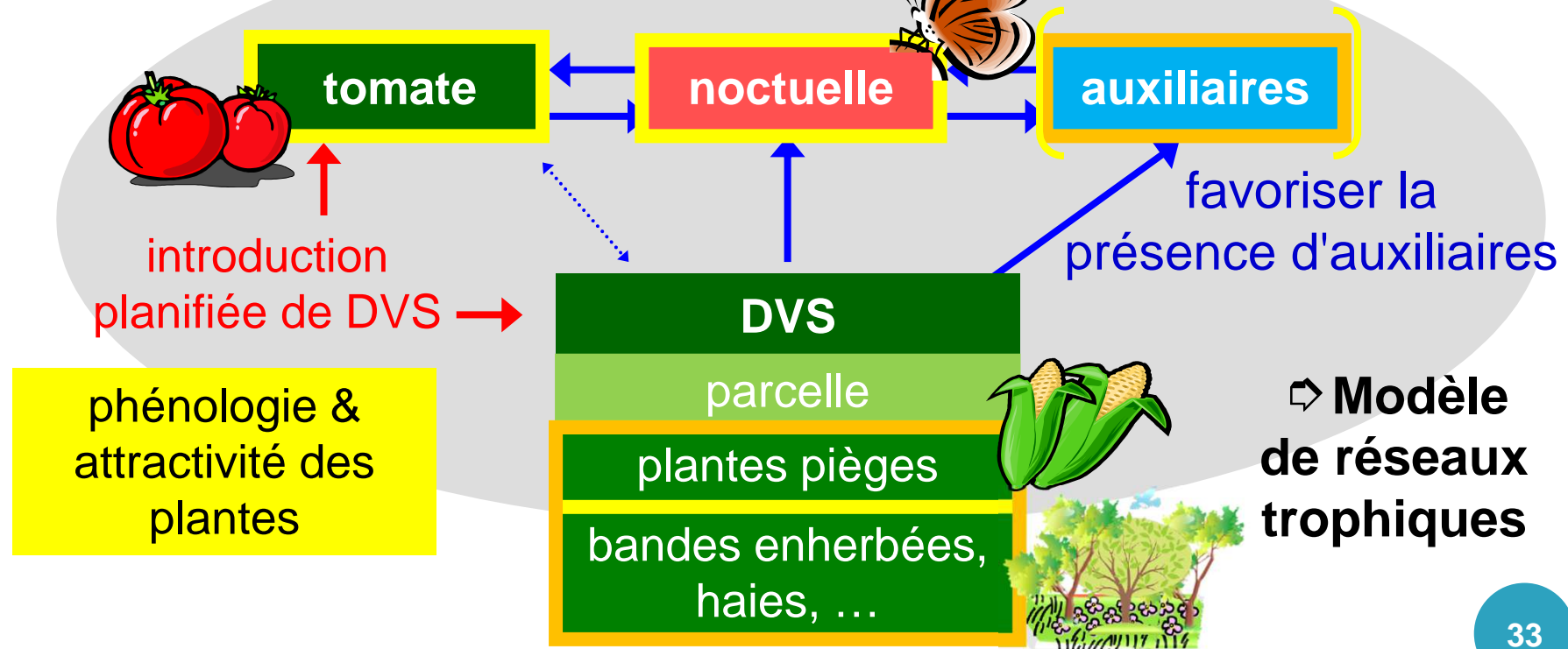
3.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES...

(1) Réduction des pontes des noctuelles sur la tomate

⇒ **Modèle individu-centré**

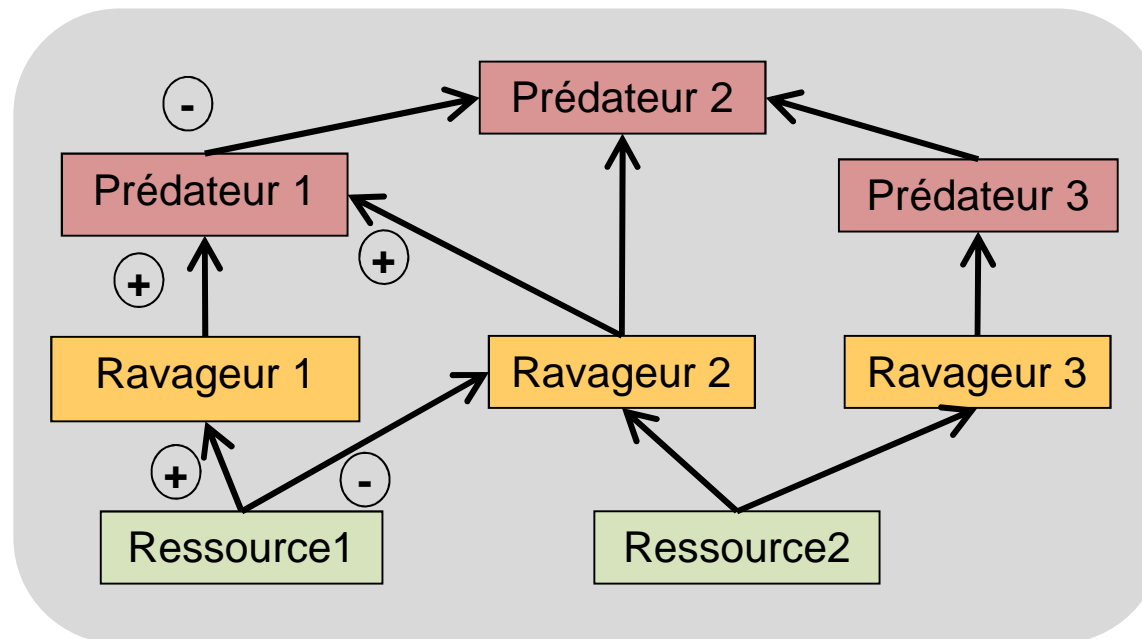
détourner les noctuelles (pontes) de la culture

(2) Prédation des noctuelles par les auxiliaires



⇒ Optimiser l'ensemble de ces mécanismes de régulation

4. OPTIONS DE MODÉLISATION DES RÉSEAUX TROPHIQUES



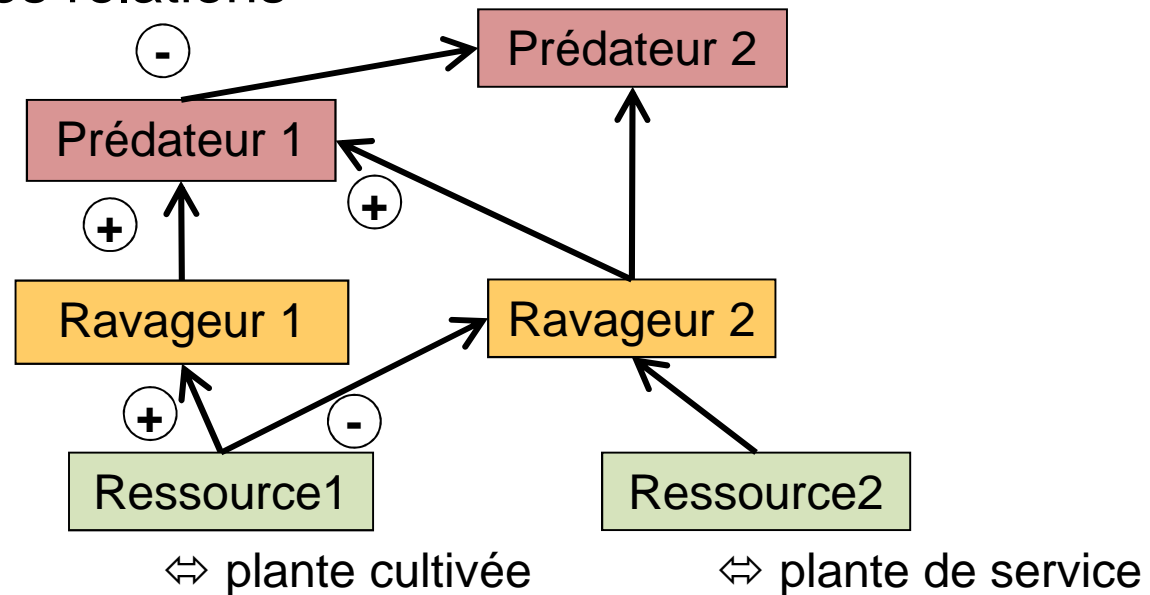
4.1. LE MODÈLE DE LOTKA-VOLERRA (MLV) ET SES EXTENSIONS

Réseau trophique : chaînes alimentaires entre les êtres vivants d'un écosystème par lesquelles circulent l'énergie et la matière

Modélisation du réseau trophique :

- conceptualisation des relations
- formalisation?

↓
**modèles de
Lotka-Volterra
(MLV)**



MLV:

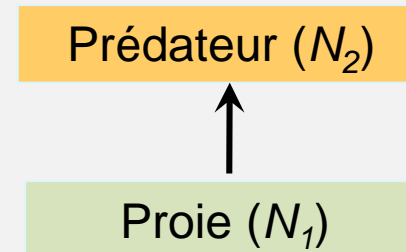
- des **formalismes simples**
- **base théorique en écologie** pour l'étude des systèmes trophiques (*Case 2000*)

4.1. LE MODÈLE DE LOTKA-VOLERRA (MLV) ET SES EXTENSIONS

MLV "proie – prédateur" de base:

$$\begin{cases} dN_2/dt = kcN_1N_2 - dN_2 \\ dN_1/dt = bN_1 - cN_1N_2 \end{cases}$$

avec b, c, k et d sont des constantes



MLV généralisé à N -niveaux trophiques:

$$\frac{dN_i}{dt} = N_i \times (k_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} \times N_j) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- k_i : **terme de croissance** intrinsèque de la population i
- a_{ij} : **termes d'interaction entre 2 populations**
 - a_{ij} : terme d'interaction entre les populations i et j
 - $a_{ii} < 0$: terme d'autolimitation

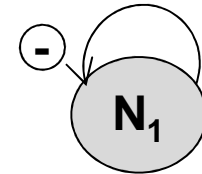
(d'après Case 2000)

4.1. LE MODÈLE DE LOTKA-VOLERRA (MLV) ET SES EXTENSIONS

Permet de représenter diverses relations :

→ **compétition intra-spécifique** : 1 population $i = 1$

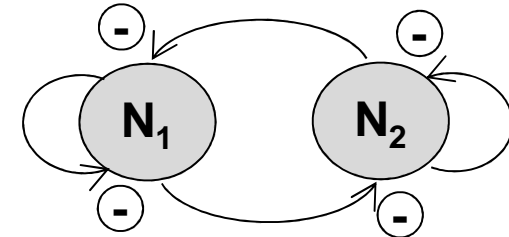
$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1} \right)$$



→ **compétition inter-spécifique** : 2 populations $i = 1$ et 2

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1 + \alpha_{12} N_2}{K_1} \right)$$

dynamique de la ressource considérée implicitement



→ **prédation** : *prédation de la population $i = 1$ par $j = 2$*

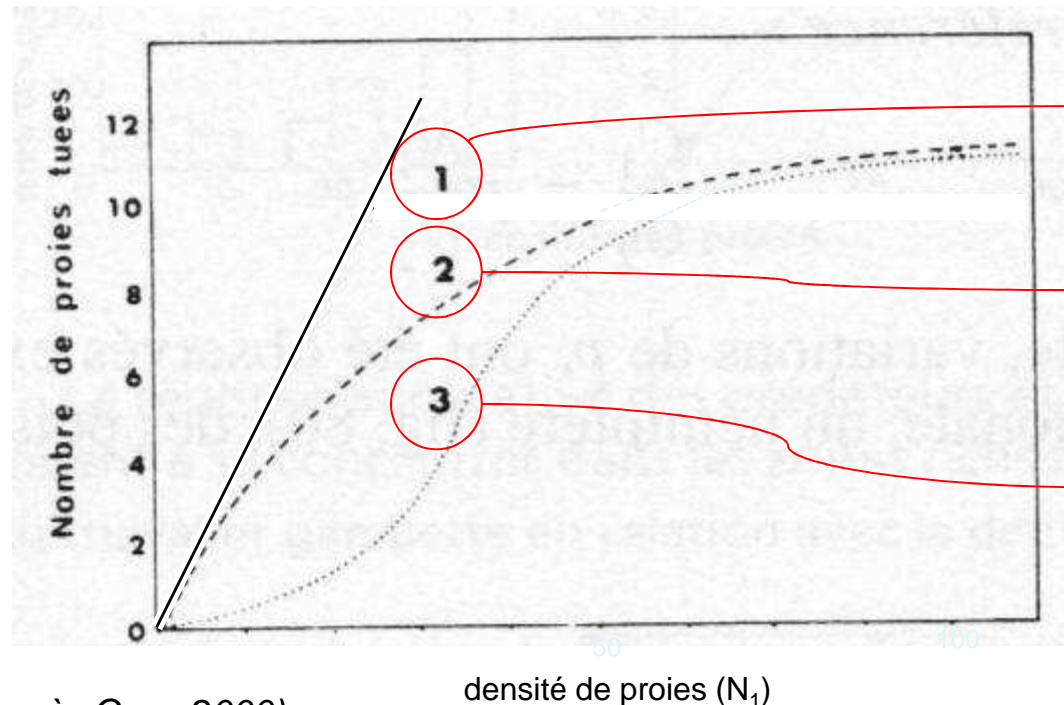
$$\frac{dN_1}{dt} = N_1 (k_1 + a_{11} N_1 + a_{12} N_2) , \quad a_{12} = \varphi_1(N_1, N_2) : \text{représente la relation de prédation entre les 2 populations}$$

= **réponses fonctionnelles de Holling**

4.1. LE MODÈLE DE LOTKA-VOLERRA (MLV) ET SES EXTENSIONS

Taux de prédation, selon la réponse fonctionnelle de Holling :

- **type I** : constant (indépendant de la densité de proies)
- **type II** : \searrow avec la densité de proies (satiété + manipulation)
- **type III** : \nearrow (acquisition d'expérience) puis \searrow avec la densité de proies (satiété + manipulation).



(d'après Case 2000)

$$\varphi_1(N_1) = aN_1 \quad \Leftrightarrow \text{MLV base}$$

$$\varphi_1(N_1) = \frac{aN_1}{1 + aT_h N_1}$$

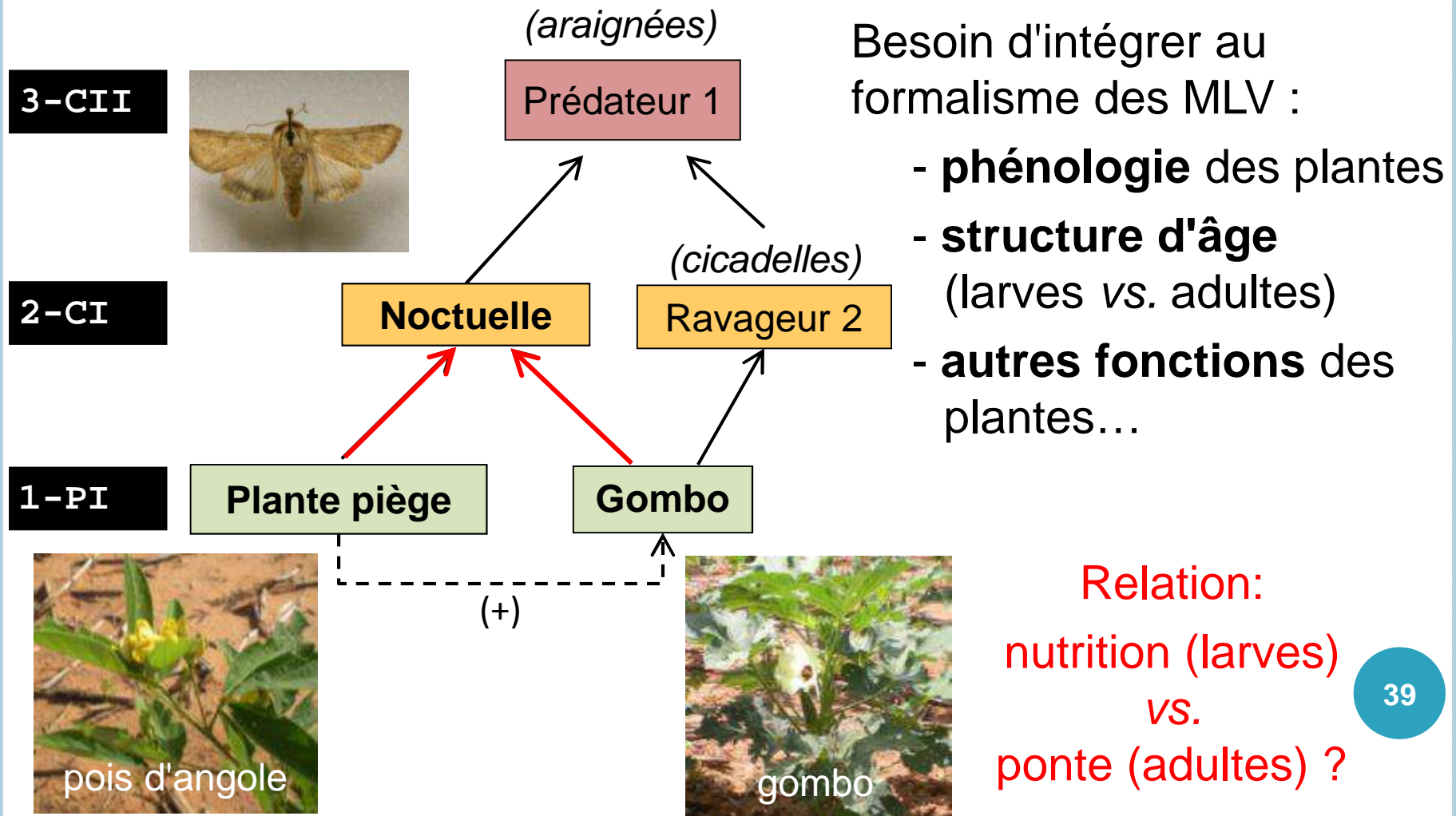
$$\varphi_1(N_1) = \frac{aN_1^2}{1 + aT_h N_1^2}$$

a = taux d'attaque

T_h = temps de manipulation

4.2. EXEMPLE DE RÉSEAUX TROPHIQUES

Régulation en détournant les noctuelles de la culture (pontes) et en favorisant la présence d'auxiliaires



4.3. CONCLUSION

Intérêt des modèles de Lotka-Volterra pour l'étude des systèmes trophiques:

- **simplicité** du formalisme
 - utilisés dans le cadre d'**études théoriques** des réseaux trophiques (*Liu et al 2004,2005; Hui & Zhu 2006; Zhang et al 2006*)
mais un **manque de réalisme biologique possible** pour des systèmes complexes
- **davantage de réalisme introduit par Gutierrez et coll**
mais adoptent des formalismes plus complexes (*Gutierrez 1996*)
 - **applications en lutte biologique** avec l'étude de réseaux trophiques : 'plante - bioagresseurs - prédateurs/parasitoïdes'
- modifications pour intégrer les effets des actes techniques, des relations autres que trophiques (abris, site de ponte,...), etc.

5. CONCLUSION GÉNÉRALE

- Comprendre la **variabilité des réponses des insectes à la diversification végétale** nécessite de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents de ces réponses .

cas des IBM: importance accordée au comportement des insectes

- **Le modèle comme outil de recherche** pour aider à la compréhension du fonctionnement du système ...
 - *tester des hypothèses sur les mécanismes sous-jacents*
 - *identifier les points de connaissance à approfondir,*
 - *guider le choix des expérimentations,*

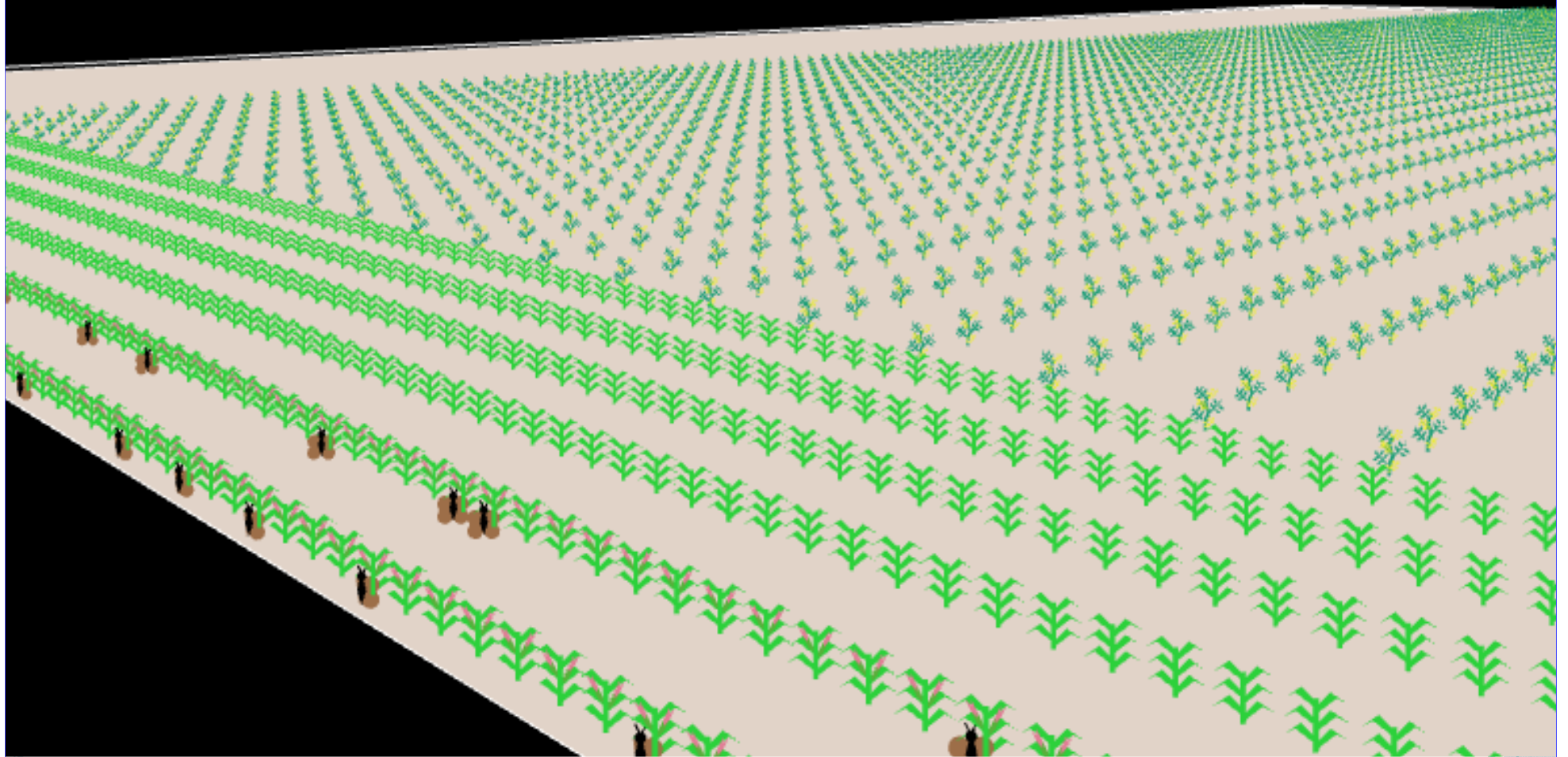
... vers un **outil opérationnel** pour faire des préconisations

- Modèle **générique** et (\pm) transposable à d'autres systèmes
 - *possibilité de tester des traits comportementaux contrastés (soit une large gamme de bio-agresseurs)*

- **Approche couplée** expérimentation - modélisation



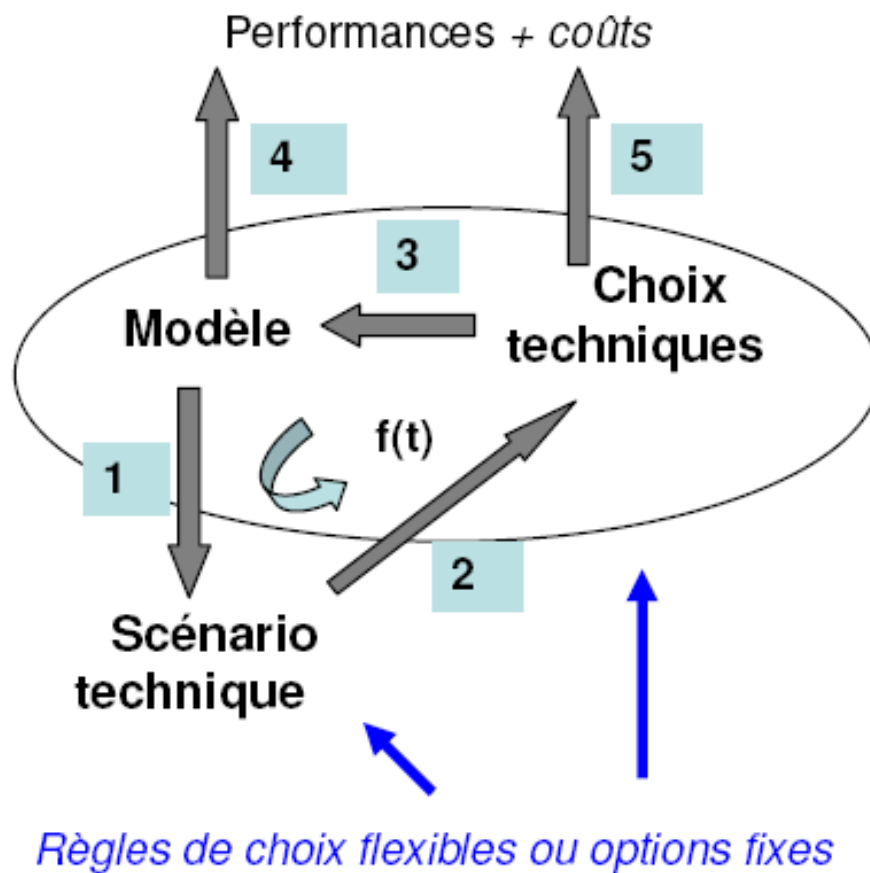
MERCI DE VOTRE ATTENTION



DIALOGUE ENTRE MODÈLE DYNAMIQUE ET SCÉNARIOS



Dialogue au cours de la simulation:



- **règles de choix flexibles** (de type Si... Alors...):

ex: seuils d'intervention

étapes (1), (2) et (3)

(1) prédiction de l'état du système par le modèle, (2) réajustement des choix techniques en fonction de cet état et des règles de choix, et (3) application de ces nouveaux choix

- **règles fixes:**

ex: le choix d'une variété uniquement étape (3)

pas de réajustement des choix techniques

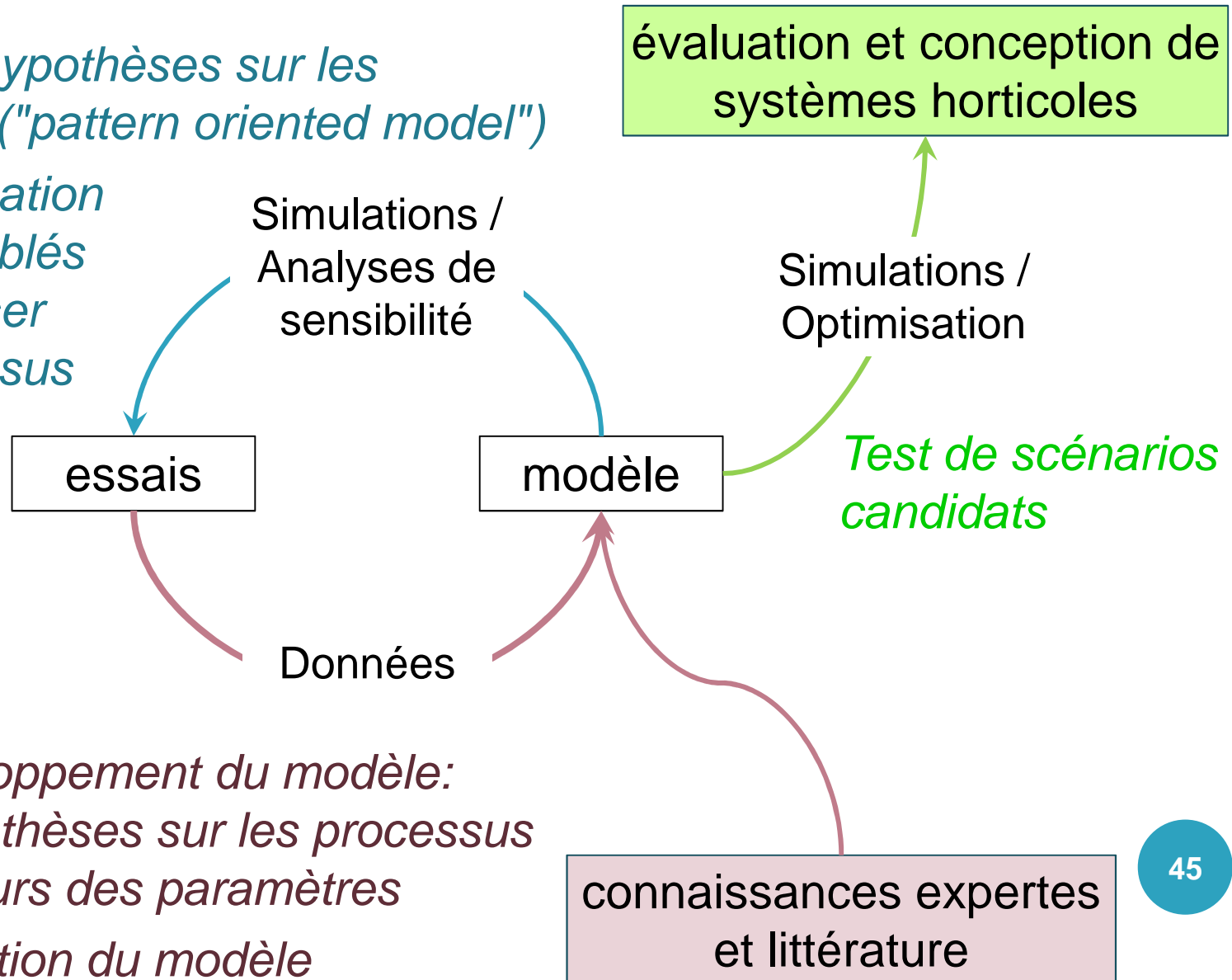
APPROCHE COUPLÉE

'EXPÉRIMENTATION – MODÉLISATION'



(1) *Test d'hypothèses sur les processus ("pattern oriented model")*

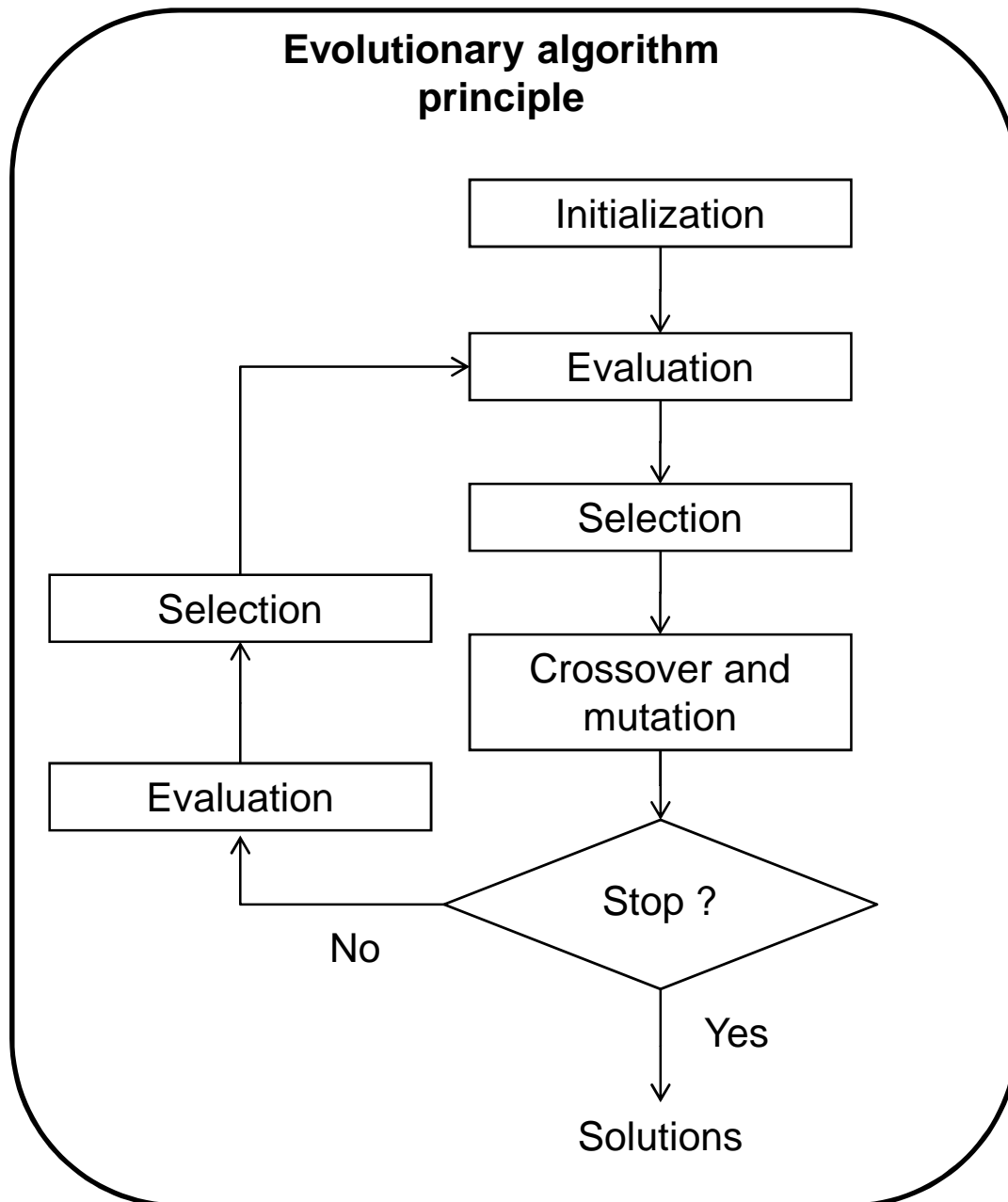
(2) *identification d'essais ciblés pour préciser des processus*



(1) *Développement du modèle:*
- *hypothèses sur les processus*
- *valeurs des paramètres*

(2) *Validation du modèle*

Evolutionary algorithm, inspired by theory of natural selection



performs an iterative improvement of the management scenarios by exploring the space of management variables

INFRASTRUCTURES ET DISPOSITIFS



piège lumineux (Niger)
→ capture de matériel
biologique pour des
essais avec lâchers

3 serres indépendantes
sous filet insect-proof
(Martinique)
→ manipulations en
conditions semis-contrôlées